Aus dem Institut für Angewandte Physiologie in Marburg
Direktor: Professor Dr. med. F. J. Haberich

Die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit des Auges (LUE) im Wahrnehmungsbereich jeweils konstanter Adaptationsleuchtdichten und das zeitliche Verhalten der LUE nach Sprüngen in der Adaptationsleuchtdichte

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades der Humanbiologie
des Fachbereichs Humanmedizin
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

BERND LINGELBACH

aus Duisburg

Aus dem Sonderforschungsbereich 122
"Adaptation und Rehabilitation"
der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Marburg 1978

Druck: Görich & Weiershäuser, Marburg

Aus dem Institut für Angewandte Physiologie in Marburg
Direktor: Professor Dr. med. F. J. Haberich

Die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit des Auges (LUE) im Wahrnehmungsbereich jeweils konstanter Adaptationsleuchtdichten und das zeitliche Verhalten der LUE nach Sprüngen in der Adaptationsleuchtdichte

INAUGURAL-DISSERTATION
zur Erlangung des Doktorgrades der Humanbiologie
des Fachbereichs Humanmedizin
der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

BERND LINGELBACH

aus Duisburg

Aus dem Sonderforschungsbereich 122

"Adaptation und Rehabilitation"

der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Marburg 1978

Druck: Görich & Weiershäuser, Marburg

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Angenommen vom Fachbereich Humanmedizin
der Universität Marburg am 12.7.1978
gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs

Dekan: Prof. Dr. med. F. Neurath
Referent: Prof. Dr. med. F. J. Haberich
Correferent: Prof. Dr. med. H. Hensel

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
1.	Einleitung	1
1.1	Allgemeine Einführung	1
1.2	Die Bereichseinstellung des Auges nach RANKE	4
2.	Fragestellung	7
3.	Methodik	8
3.1	Einführung	8
3.2	Versuchsaufbau	9
3.3	Beschreibung des Adaptometers	11
	a) Das Umfeld	11
	b) Testfeld	12
	c) Konstanz der Leuchtdichten und Eichung	14
	d) Versuchsablauf, elektronische Steuerung	14
	α) bei konstantem Umfeld	15
	ß) bei sprunghafter Änderung des Umfeldes	15
3.4	Versuchsdurchführung	17
3.5	Auswertung	18
3.6	Versuchspersonen	19
3.7	Nomenklatur	19
4.	Ergebnisse	22
4.1	Verhalten der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_U, foveal	22
4.1.1	Photopischer Bereich	22
	a) Einfluß der Größe des Testfeldes	22
	b) Verhalten der Leuchtdichteunterschiede (ΔL) als Funktion konstanter Umfeldleuchtdichten L_U bei konstanter Testfeldgröße (1^o)	24
	c) Analyse der Kurven der Unterschiedsempfindlichkeit (entsprechend Abb. 9)	27
	d) Verhalten der LUE bei einem Protanopen	31
4.1.2	Skotopischer Bereich	32

Seite

4.2 Verhalten der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_U, parafoveal 38
4.2.1 Testfeldgröße 2^o, Netzhautort 6^o temporal 38
4.2.2 Testfeldgröße 2^o, Netzhautort 12^o temporal 45
4.3 Zeitlicher Verlauf der LUE nach einem Sprung in der Adaptationsleuchtdichte im photopischen Bereich 50
4.3.1 Sprung in der Adaptationsleuchtdichte von einer hohen zu einer niedrigen Umfeldleuchtdichte 50
4.3.2 Sprung in der Adaptationsleuchtdichte von einer niedrigen zu einer höheren Umfeldleuchtdichte 52
4.4 Tagesgang 60
5. Diskussion 64
5.1 Verhalten der Leuchtdichteunterschiedsschwelle bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_U 64
5.1.1 Photopischer Bereich 64
a) Vergleich mit den Ergebnissen von KERN 64
b) Die "statische Kennlinie" und die "dynamischen Kennlinien" nach den Modellvorstellungen von RANKE 67
c) Die Darstellung der "Kennlinien" nach den vorliegenden Ergebnissen 68
d) Die Berechnung der "dynamischen Kennlinien" 72
5.1.2 Skotopischer Bereich 75
5.2 Parafovealer Bereich 79
5.3 Vergleich der Leistungen von Fovea und Peripherie 81
5.3.1 Verhalten der LUE 81
5.3.2 Der Gesamtwahrnehmungsbereich und die dynamischen Kennlinien für Fovea und parafoveale Netzhautorte (6^o und 12^o temporal) 85

		Seite
5.3.3	Die statischen Kennlinien	92
5.4	Zeitlicher Verlauf der Adaptation nach sprunghafter Änderung der Umfeldleuchtdichte und Tagesgang	95
6.	Weiterführende Fragestellung	98
7.	Zusammenfassung	99
8.	Literaturverzeichnis	

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41546010_0069

1. Einleitung

1.1 Allgemeine Einführung

Schon bald nachdem G. Th. FECHNER 1859 "Über ein psychophysisches Grundgesetz" berichtet hatte, kamen Zweifel über die Allgemeingültigkeit dieses Gesetzes auf. Im "Handbuch der physiologischen Optik", Bd. II (1866), beschreibt Hermann von HELMHOLTZ einen einfachen Versuch, der die allgemeine Gültigkeit der WEBER'schen Regel in Frage stellt. (Unter der WEBER'schen Regel versteht man bekanntlich die Konstanz des Verhältnisses von gerade wahrnehmbarer Reizzuwachsgröße (ΔR) zur Reizgröße (R), also $\Delta R/R$ = konst. für verschiedene Reizgrößen.)

Die Anordnung von v. HELMHOLTZ war folgende: auf einer weißen, runden Scheibe ist radial eine unterbrochene Linie entsprechend Abb. 1 mit Tusche aufgetragen. Ihre einzelenen Segmente sollen alle die gleiche Dicke haben. Bei Rotation der Scheibe ergeben die schwarzen Striche graue Kreise auf der Scheibe. Die grauen Streifen unterscheiden sich umso weniger von der Helligkeit der Scheibe, je größer ihr Radius ist; die inneren sind dunkler, die äußeren heller.

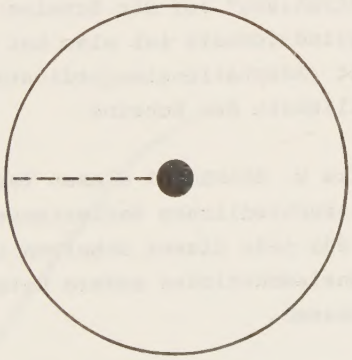


Abb. 1. Muster für eine rotierende Scheibe zur Erzeugung feiner Kontraste (nach v. HELMHOLTZ)

v. HELMHOLTZ beobachtete dann (S. 366 - 367):

"Ich konnte an hellen Sommertagen am Fenster bei Bewegung des Blickes noch einen Rand scharf sehen, wo der Unterschied der Helligkeit 1/133 war, und verwaschen erschien mir auch

noch ein Rand von 1/150, auf Augenblicke sogar einer von 1/167 Unterschied. Etwas mühsamer und anstrengender erschienen die Wahrnehmungen bis zu 1/150 bei direkter Sonnenbeleuchtung der Scheibe. In der Mitte des Zimmers konnte ich zu derselben Zeit nur Ränder von 1/117 Unterschied wahrnehmen, den von 1/133 nur selten und unbestimmt."

Von diesen Beobachtungen von v. HELMHOLTZ sind für die vorliegende Arbeit zwei Punkte von besonderer Bedeutung:

1. Die Unterschiedsempfindlichkeit, gemessen in $L/\Delta L$ (L: Leuchtdichte, ΔL: gegenüber L gerade wahrnehmbarer Unterschied) ist entgegen der WEBER'schen Regel abhängig von der Umfeldleuchtdichte, auf die das Auge gerade adaptiert ist.

2. Bei Adaptation an eine bestimmte Helligkeit (helles Sonnenlicht) steigt die Unterschiedsempfindlichkeit nicht unbedingt, wenn die Scheibe heller als ihre Umgebung ist ("direkte Sonnenbestrahlung" auf die Scheibe). Die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit ist also bei einer bestimmten Umfeldhelligkeit (Adaptationsleuchtdichte) auch noch abhängig von der Helligkeit der Scheibe.

Hätte v. HELMHOLTZ diesen Versuch auch noch mit Scheiben von unterschiedlichem Reflexionsvermögen durchgeführt, so hätte er für jede dieser Scheiben in Abhängigkeit von der Adaptationsleuchtdichte andere Unterschiedsempfindlichkeiten gemessen.

Die grundlegenden Arbeiten zu Pkt. 1 stammen von KÖNIG und BRODHUN (1889). Innerhalb eines Umfeldes war ein Prüffeld von $6^{\circ} \times 4.5^{\circ}$ projiziert. Die Vp sollte den gerade noch wahrnehmbaren Helligkeitsunterschied zwischen Umfeld und Prüffeld einstellen, wozu ihr beliebig viel Zeit gegeben wurde.

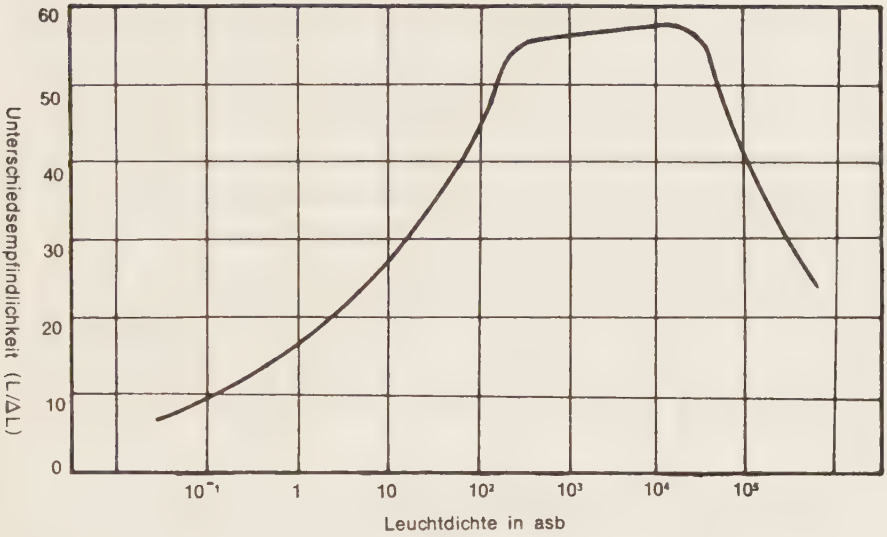


Abb. 2a. Die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges nach KÖNIG-BRODHUN

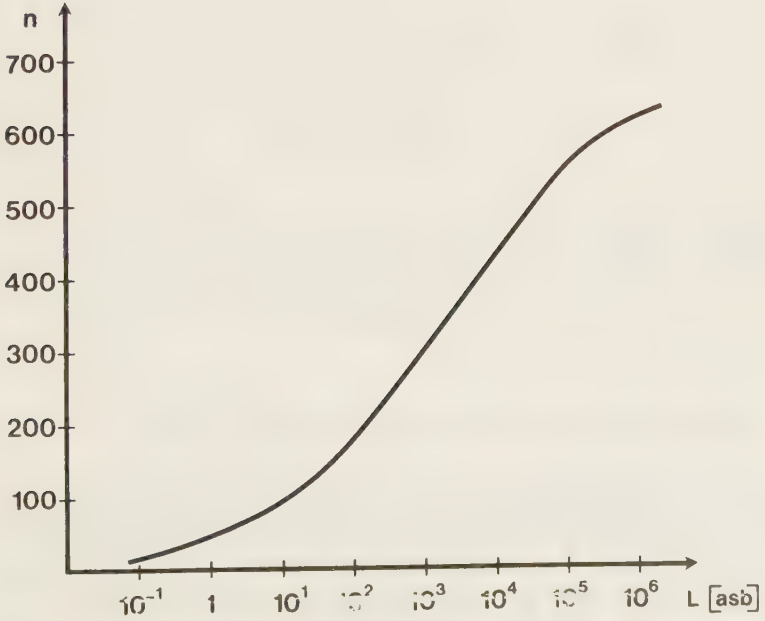


Abb. 2b. Die Anzahl der durchlaufenen Unterschiedsstufen (n) (berechnet nach der Darstellung in Abb. 2a)

Von niedrigen Intensitäten aufsteigend ist so die berühmte KÖNIG-BRODHUN-Kurve gewonnen worden, die in Abb. 2a dargestellt ist. Nach den Untersuchungen von KÖNIG und BRODHUN umfaßt die Gesamtzahl der im ganzen Leuchtdichtebereich unterscheidbaren Unterschiedsempfindlichkeitsstufen ungefähr 660 (siehe auch Abb. 2b.). Auch aus dieser Kurve geht bereits klar hervor, daß die WEBER'sche Regel, wenn überhaupt, nur einen relativ beschränkten Gültigkeitsbereich hat, der durch das Plateau der Kurve dargestellt ist. Der zugehörige Leuchtdichteabschnitt umfaßt nur etwa 2 Dekaden. Dieser Teil entspricht allerdings dem Bereich des üblichen Tagessehens. Hier beträgt die relative Unterschiedsschwelle knapp 2% ($L/\Delta L \approx 56$ bis 58).

Später ist die Unterschiedsempfindlichkeit bezogen auf die jeweilige Umfeldleuchtdichte unter den unterschiedlichsten Aspekten (z. B. Testfeldgröße, Reizdauer, Netzhautort etc.) oft Gegenstand von Untersuchungen gewesen. Erstaunlicherweise ist dabei der Punkt 2, die Frage nach dem Leuchtdichtebereich, innerhalb dessen das Auge bei einem festgehaltenen Adaptationszustand nach unten und oben noch Leuchtdichteunterschiede wahrnehmen kann, lange vernachlässigt worden. Erst die Arbeiten von CRAIK (1938), KÜHL (1940) und SCHUMACHER (1940) befassen sich mit diesem Problem.

Eine umfassendere Darstellung und theoretische Analyse zur Bereichseinstellung des Auges findet sich erst sehr viel später bei RANKE (1953, 1956, 1957, 1961) bzw. KERN (1953). Diese Arbeiten gaben auch die Anregung zu der vorliegenden Untersuchung.

1.2 Die Bereichseinstellung des Auges nach RANKE

RANKE geht davon aus, daß bei jeder Adaptationsleuchtdichte ein Gleichgewicht zwischen der Zersetzungs- und Bildungsgeschwindigkeit photosensibler Substanz besteht. Dieser statische Zustand ist durch die Gleichgewichtskonstante bestimmt.

Die Größe der Gleichgewichtskonstanten wird vom Sinnesorgan auf den Nervus opticus als "Aktionsstromfrequenz" übertragen: das ist die "statische Kennlinie" nach Abbildung 3. Trifft auf eine Stelle in der Netzhaut plötzlich mehr oder weniger Licht auf als es der Adaptationsleuchtdichte entspricht, so ändert sich auch die Zersetzungsgeschwindigkeit, was wieder in eine andere Aktionsstromfrequenz codiert wird. Wir erhalten die "dynamische Kennlinie". RANKE setzt dabei die "Aktionsstromfrequenz" direkt proportional der "Empfindung".

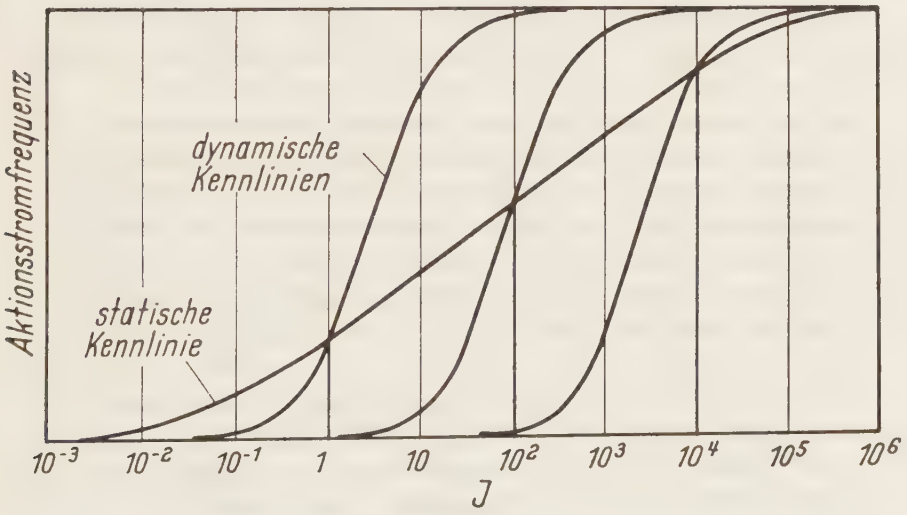


Abb. 3. Schematische Darstellung der statischen Kennlinie und einiger dynamischer Kennlinien nach RANKE (1961).

Unter den Bedingungen des natürlichen Sehens entspricht die adaptive Einstellung der jeweiligen mittleren Leuchtdichte aller Objekte im Gesichtsfeld. Der Gesamtumfang der Adaptationsfähigkeit des Auges an Leuchtdichten verhält sich wie 1 : 10^{8-9}. Bei Adaptation an eine bestimmte Leuchtdichte können "gleichzeitig" nur Leuchtdichteunterschiede im Bereich von etwa 1 : 10^{3-4} erfaßt werden. Das Auge muß sich jeweils auf einen Bereich einstellen, dessen Lage durch die "mittlere Adaptationsleuchtdichte" bestimmt wird. Die Unterschiedsempfindlichkeit in diesem Bereich ist gegeben durch die "dynamische Kennlinie". Zu jeder Adaptationsleuchtdichte gehört eine dynamische Kennlinie. Leuchtdichten, die geringer sind als dem jeweiligen Fußpunkt der dynamischen Kennlinie entsprechend, erscheinen subjektiv schwarz. Solche oberhalb des jeweiligen Sättigungswertes erscheinen subjektiv weiß. Die beste Unterschiedsempfindlichkeit finden wir im steilsten Bereich der Kennlinie. Bei mittleren Adaptationsleuchtdichten liegt die beste Unterschiedsempfindlichkeit etwa bei der Adaptationsleuchtdichte. In Abb. 3 entspricht dies der Lage des Schnittpunkts der statischen Kennlinie mit der jeweiligen dynamischen Kennlinie. Wenn die Adaptationsleuchtdichte verändert wird, verschiebt sich die dynamische Kennlinie parallel zur Abszisse mit. Der wahrnehmbare Bereich stellt sich auf das neue Niveau ein.

Wir wissen heute aus vielen Arbeiten, daß die Adaptation am Auge nicht alleine durch einen photochemischen Prozess erklärt werden kann (z. B. BLACKWELL, 1963; CAMPBELL und RUSHTON, 1955; CRAIK, 1938; CRAWFORD, 1946, 1947; CREUTZFELDT, 1972; RUSHTON, 1972b; ZERBST und DITTBERNER, 1973. Weitere Literatur bei BARLOW (1972) und BLACKWELL (1972)).

Trotzdem ist das hieraus abgeleitete RANKE'sche Modell noch von Bedeutung, weil es die beobachteten Phänomene qualitativ richtig beschreibt. Im übrigen zeichnet es sich durch seine besondere Anschaulichkeit aus, so daß der Begriff "Bereichseinstellung" unmittelbar daraus klar wird.

Wir werden sehen, daß das Konzept der "dynamischen Kennlinien" und "statischen Kennlinie" durchaus nützlich ist und auch bestätigt wird, sofern "Aktionsstromfrequenz" durch "Anzahl von Unterschiedsschwellen" ersetzt wird.

2. Fragestellung

KERN, ein Schüler RANKEs, hat die Bereichseinstellung des Auges gemessen (KERN, 1953). Zu jedem Adaptationsniveau gehört eine charakteristische Funktion für die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit (LUE). Das Maximum der LUE fand KERN bei der jeweiligen Adaptationsleuchtdichte. Zu niedrigeren und höheren Leuchtdichten fällt die LUE schnell ab zum "subjektiven Schwarz" bzw. "subjektiven Weiß". KERN hat diese Versuche nur im photopischen Bereich foveal und nur mit einer Testfeldgröße von 0.5^{o} durchgeführt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen von KERN lassen sich nicht mit den Modellvorstellungen von RANKE vereinbaren. Dieser Umstand und noch gewisse methodische Mängel der von KERN benutzten Versuchsanordnung - Streulicht, Refraktionskorrektur der Vp - haben uns zunächst veranlaßt, diese Messungen zu wiederholen und zu erweitern (skotopischer Bereich, parafoveale Netzhautorte). Besonderen Wert legten wir ferner darauf, die Verschiebung der Bereichseinstellung des Auges nach Sprüngen in der Adaptationsleuchtdichte zeitlich zu verfolgen. Diese Frage ist unseres Wissens bisher nur in Teilaspekten untersucht worden (z. B. AULHORN, 1961, 1963, 1966; BAKER, 1955, 1963; BAKER, DORAN und MILLER, 1959; CRAWFORD, 1937; DANNHEIM, 1969; HABERICH, 1954; HARTMANN, 1963, 1969; SPILLMANN, NOWLAN und BERNHOLZ, 1972; TIBURTIUS, 1969). Sie ist von besonderer praktischer Bedeutung, weil das Erkennen von Leuchtdichteunterschieden oft unter solchen "Adaptationssprüngen" erforderlich ist (z. B. beim Autofahren die Einfahrt in einen Tunnel bzw. die Ausfahrt aus einem Tunnel heraus).

Schließlich ist für eine spezielle, ausgewählte Versuchsbedingung der Tagesgang der Leuchtdichteunterschiedsschwelle verfolgt worden.

3. Methodik

3.1 Einführung

Die methodische Schwierigkeit liegt darin, den Adaptationszustand einer Versuchsperson konstant zu halten und ihr gleichzeitig zwei zusätzliche Leuchtdichten zur Unterscheidung in einem Testfeld darzubieten. Diese Leuchtdichten in dem Testfeld werden in der Regel von der Umfeldleuchtdichte abweichen. Für die Anordnung der Leuchtdichten im Testfeld gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten: entweder zwei aneinandergrenzende Halbfelder oder zwei ineinandergeschachtelte konzentrische Felder, wie in Abb. 4 dargestellt.

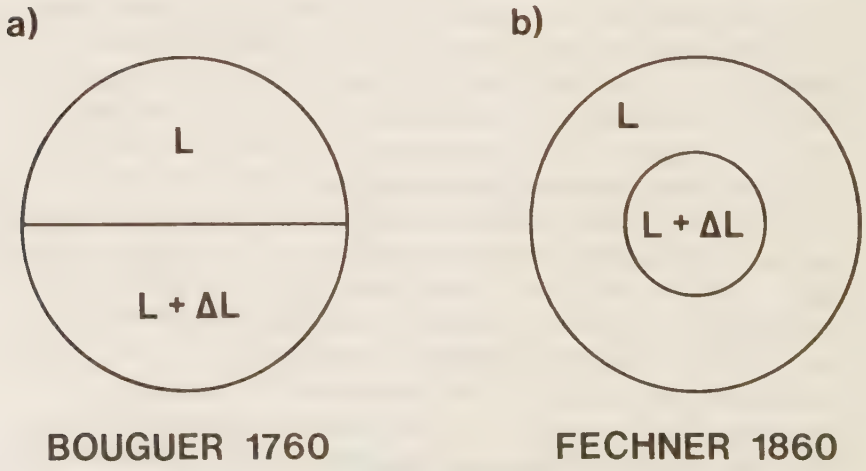


Abb. 4. Anordnung des Testfeldes nach BOUGUER und FECHNER (nach RUSHTON, 1972a)

Wir entschlossen uns für eine Testfeldanordnung nach Abb. 4a. Einmal, weil KERN in seiner Apparatur diese Anordnung gewählt hat, zum anderen, weil es sich gezeigt hat, daß die Verhältnisse für Anordnung 4b technisch-methodisch komplizierter sind (RUSHTON, 1972a).

Für die vorliegenden Versuche mußte ein Adaptometer entwickelt und gebaut werden, da es auf dem Markt kein entsprechendes Gerät gibt. Außerdem sollten die Mängel vermieden werden, welche die Apparatur von KERN, wie wir noch sehen werden, hatte.

3.2 Versuchsaufbau

Abb. 5 zeigt eine schematische Darstellung unseres Versuchsaufbaus. Eine Versuchsperson (Vp) sitzt vor einer mattweißen Adaptometerhalbkugel von 60 cm Durchmesser. Ein Auge wird genau in das Zentrum der Kugel einjustiert und wird so auskorrigiert, daß die Versuchsperson ohne Akkommodation ein Luftbild des Testfeldes beobachten kann, das in der Ebene der Adaptometerhalbkugel in einem Fenster (= 30 cm) erscheint. Das andere Auge wird mit einer lichtdurchlässigen zerstreuenden Klappe abgedeckt. So hat dieses Auge jeweils einen ähnlichen Adaptationszustand wie das andere, kann aber selbst außer Hell-Dunkel nichts wahrnehmen. In der Mitte der Kugelfläche wird für jeweils 0.4 sec das Testfeld freigegeben. Die Vp sieht die Helligkeitsverteilung, wie sie in Abb. 6 dargestellt ist. Sie soll entscheiden, ob der obere oder untere Teil des Testfeldes heller ist.

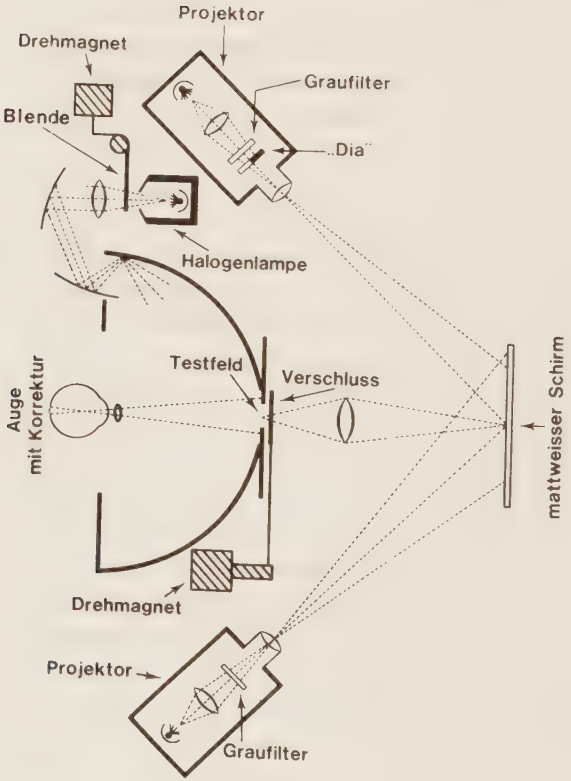


Abb. 5. Schema der Versuchsanordnung

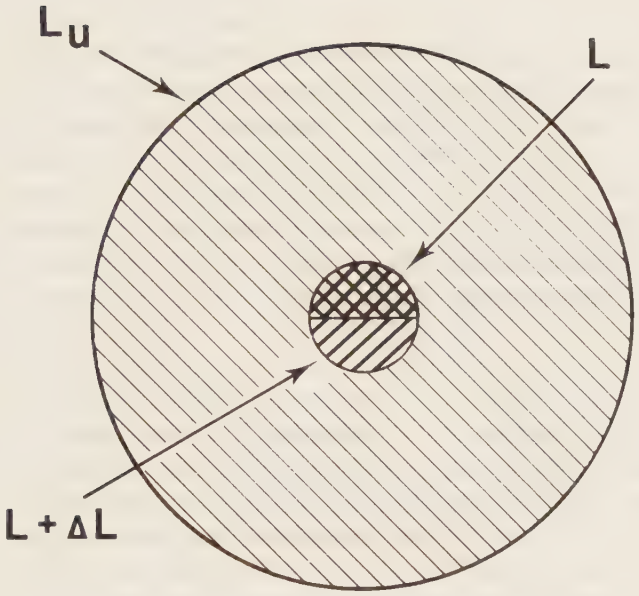


Abb. 6. Leuchtdichteverteilung bei geöffnetem Verschluß
L_U: Umfeldleuchtdichte
L_U und L + ΔL: Testfeldleuchtdichten

3.3 Beschreibung des Adaptometers

a) Das Umfeld

Die gleichmäßige Ausleuchtung der Umfeldkugel gelingt am besten mit einer indirekten Lichtquelle. Die Halbkugel zeigt dann schon teilweise das Verhalten einer "Ulbricht-Kugel". Um diesen Effekt noch zu verstärken, haben wir die Vorderseite der Halbkugel teilweise geschlossen, wie es in Abb. 5 zu sehen ist. Die Versuchsperson kann ihren Kopf mit Hilfe der verstellbaren Kinnstütze bequem in der verbleibenden Öffnung einjustieren. Mittels einer Justierhilfe wird dafür

gesorgt, daß sie ein Auge genau in das Zentrum der Kugel bringen kann.

Auf der Halbkugel sitzt in einem Gehäuse die eigentliche Lichtquelle, eine 15V/15OW Halogenlampe. Über eine Linse und zwei konkave Umlenkspiegel wird sie außerhalb des Gesichtsfeldes der Vp oben in die Adaptometerhalbkugel abgebildet. Dieser Lichtfleck ist die indirekte Beleuchtungsquelle. Vor dem Lampengehäuse sitzt eine bewegliche Blende, mit der die Leuchtdichte der Adaptometerhalbkugel verändert werden kann. Auf diese Weise können Sprünge in der Adaptationsleuchtdichte erzeugt werden.

b) Testfeld

Die Testfeldleuchtdichten L und ΔL (Abb. 6) sollen unabhängig vom Umfeld variierbar sein. Nach mehreren Vorversuchen schien es am günstigsten zu sein, der Vp ein Luftbild der Leuchtdichteverteilung anzubieten, weil dann der Einfluß von Streulicht gering und vor allem meßbar ist. Die Leuchtdichteverteilung wird deshalb auf dem mattweißen Schirm (Abb. 5) mit zwei Diaprojektoren (Braun D 300) eingestellt. Der eine Projektor erzeugt dabei in der Bildebene die Helligkeit L im gesamten Testfeld, der andere nur in einer Hälfte die zusätzliche Leuchtdichte ΔL.

Die Leuchtdichten selbst werden stufenweise verändert. Die beiden Magazine enthalten als "Dias" Graufilter mit steigender Absorption. (Graufilter Fa. SCHOTT, Mainz). Es ist für diese Art der Versuche sehr wichtig, daß die verschiedenen Filter einheitliche spektrale Durchlässigkeiten zeigen, weil es kein "ideal graues" Filter gibt. Deshalb haben wir uns bei der Auswahl der Filter auf die Glassorten NG 4 und NG 9 und einige des Typs NG 11 beschränkt. Die notwendigen unterschiedlichen Absorptionsgrade ergeben sich durch die unterschiedliche Dicke der Gläser. Die äußeren Abmessungen der Filter betragen 50 x 50 mm, so daß sie wie normale Dias gehandhabt werden können.

Zur Erzeugung der Testfeldhelligkeit L wird ein "Neutralsatz" von 16 Filtern der optischen Dichte 0.15 bis 5 benutzt (etwa 3 bis 4 Filter pro Dekade). Die weitere Abschwächung erfolgt durch einen zusätzlichen Filter, der in einer eigens dazu angefertigten Halterung vor dem Objektiv in den Strahlengang gebracht werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, von der neuen Grundhelligkeit aus die Leuchtdichte L noch einmal in 16 Stufen abzuschwächen.

Der andere Projektor erzeugt die zusätzliche Leuchtdichte ΔL. Der Braun D 300 Projektor besitzt eine zweite Objektebene. Hier ist eine geschwärzte Schneide so drehbar angebracht, daß die Mitte der Schneidenkante genau auf der optischen Achse des Systems liegt. Die Schneide wird auf den Schirm scharf abgebildet, die Schneidenkante erscheint als waagerechte Trennungslinie in der Mitte des Schirms. Je nach ihrer Stellung erhält der Schirm zusätzlich nur in der oberen oder unteren Hälfte Licht, wobei die Trennlinie der Felder unverändert bleibt.

Die Leuchtdichten für ΔL müssen wesentlich feiner abgestuft sein als die für L. Die verwendeten Filter haben Unterschiede in der optischen Dichte von etwa 1/10 bis 1/20 innerhalb einer Dekade der Absorption. Es können fast 3 Dekaden abgedeckt (40 Filter) werden. Für noch geringere Werte ΔL werden zusätzliche Filter in den Strahlengang geschaltet und damit der Bereich der Leuchtdichte weiter verschoben.

Die Adaptometerhalbkugel hat in der Mitte eine Öffnung von 10 cm Durchmesser. Durch einen Federmechanismus wird eine mattweiße Metallplatte von hinten an diese Öffnung gepreßt. Die Metallplatte hat in der Mitte ein kleines Loch. Sie ist austauschbar mit anderen Platten, die sich nur durch den Öffnungsquerschnitt unterscheiden. Die durch die Schneide erzeugte Trennlinie auf dem mattweißen Schirm wird genau in die Mitte der Öffnung abgebildet. Bei geschlossenem Verschluß wird der Vp ein einheitliches Feld dargeboten.

Bei geöffnetem Verschluß sieht die Vp die Helligkeitsverteilung, wie sie in Abb. 6 dargestellt ist. (Der jeweilige Lochquerschnitt bestimmt die Testfeldgröße). Der Verschluß kann durch einen Drehmagneten geöffnet werden. Die Öffnungszeit beträgt 0.4 sec. Damit dürfte eine Adaptation an das Testfeld während der Darbietungszeit gering sein, außerdem reichen 0.4 sec. für eine sichere Wahrnehmung aus (TSCHERMAK, 1929).

Als Testfeldgröße wählten wir 0.5^{o}, 1^{o}, 2^{o} und 3^{o}. Für Messungen im peripheren Bereich sowie bei besonders geringer Umfeldleuchtdichte werden zusätzlich Fixiermarken angebracht.

c) Konstanz der Leuchtdichten und Eichung

Die Lichtstärke einer Lampe ist abhängig von der Stromstärke. Deshalb sind die Lampen zur Umfeldbeleuchtung und die der Projektoren an Stromkonstanter (Gossen 84T32 R4O) angeschlossen. Die Projektorlampen (Halogenlampen 15V/15OW) sind dabei hintereinandergeschaltet, damit die Stromstärke in beiden Lampen gleich ist. Außerdem werden alle Lampen mit Unterspannung betrieben. Auf diese Weise kann die Lebensdauer erheblich verlängert werden. Vor allem ist aber über einen längeren Zeitraum mit einer höheren Konstanz der Leuchtdichten zu rechnen. Die Leuchtdichten, insbesondere die Testfeldhelligkeiten, sind mit einem Pritchard-Photometer Typ 198O gemessen worden (alle Angaben in cd/m^2; photopisch, bewertet nach V_λ). Zusätzlich werden wöchentlich die Leuchtdichten der Lampen überprüft. Die Farbtemperatur für Umfeld und Infeld beträgt etwa $2300^{o}K$.

d) Versuchsablauf, elektronische Steuerung

Der Versuchsablauf wird durch eine eigens entwickelte elektronische Prozeßschaltung gesteuert.

α) Versuchsablauf bei konstantem Umfeld

Zunächst adaptiert die Vp während der Zeit t_A an die gerade herrschende Umfeldleuchtdichte L_U. t_A wird je nach Bedarf zwischen 10 und 60 sec eingestellt. 2 sec vor Ablauf von t_A bekommt die Vp ein akustisches Zeichen (Warnton). Nach Ablauf von t_A wird für 0.4 sec der Testfeldverschluß geöffnet (Schaltzeit 10 bis 20 ms). Die Versuchsperson soll entscheiden, ob das obere oder untere Feld heller ist. Wenn der Verschluß wieder zu ist, beginnt der Versuch mit der Adaptationszeit t_A von neuem. Die Anzahl der Durchläufe wird an einem Zählwerk angezeigt.

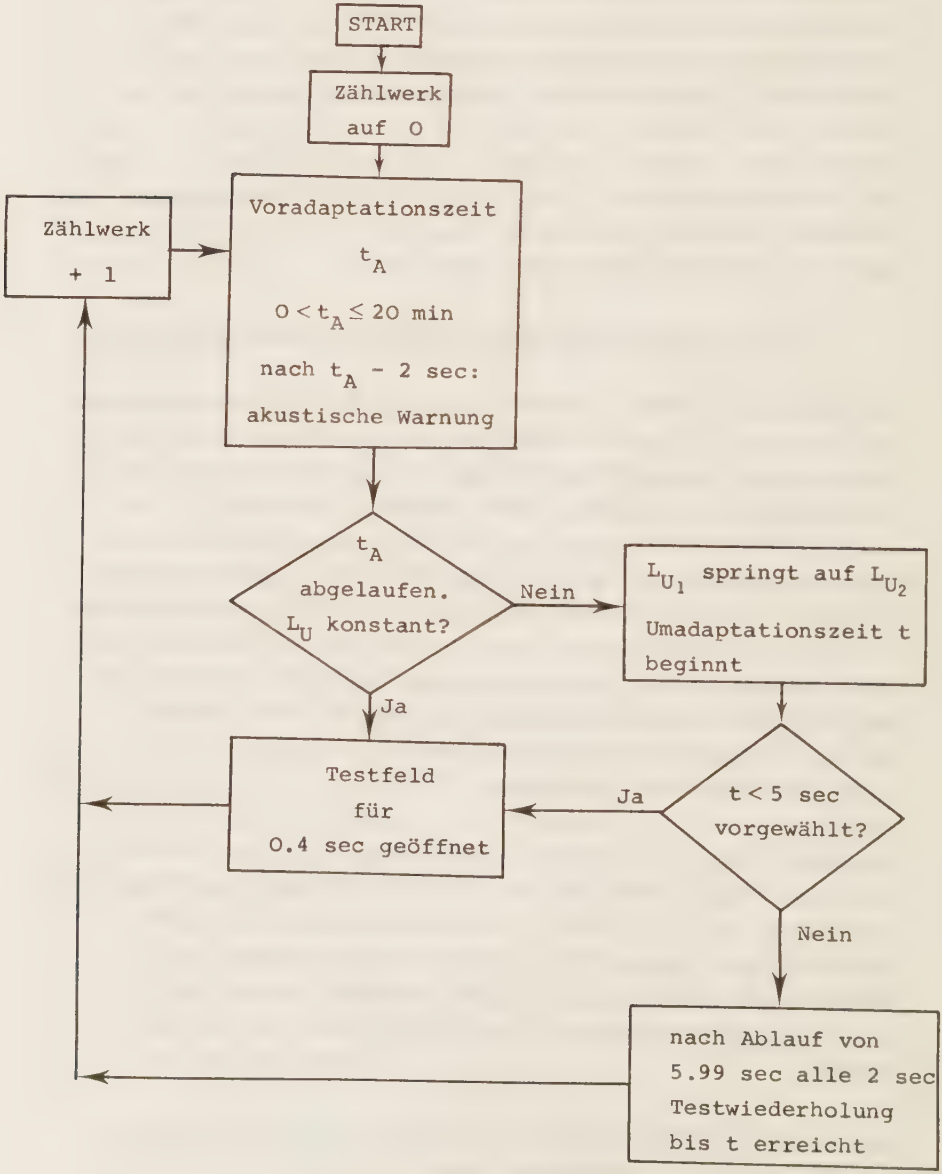
ß) Versuchsablauf bei sprunghafter Änderung des Umfeldes

Die Vp wird wieder in der Zeit t_A an eine Umfeldleuchtdichte L_{U_1} adaptiert. 2 sec vor Ablauf von t_A erhält sie ein akustisches Zeichen. Nach Ablauf von t_A wird die Umfeldleuchtdichte L_{U_2} mittels einer Blende eingestellt. Gleichzeitig beginnt für die Vp die Umadaptationszeit t an die neue Leuchtdichte L_{U_2}. t kann zwischen 0.01 sec und 4.99 sec variiert werden. Nach Ablauf von t wird für 0.4 sec das Testfeld freigegeben. Die Vp entscheidet "oben heller" bzw. "unten heller" ("forced choice", BLACKWELL (1952)). Nachdem das Testfeld verdeckt ist, springt kurz darauf die Umfeldleuchtdichte auf den Wert L_{U_1} zurück. Der Versuch kann von vorne beginnen.

Wenn die Umadaptationszeit t größer als 5 sec vorgewählt wird, so öffnet sich nach Ablauf von 5.99 sec alle 2 sec der Verschluß, bis ein vorher vom Versuchsleiter im Testfeld eingestellter Kontrast von der Vp richtig erkannt wird. Es wird dann zusätzlich die Zeit gemessen,welche die Vp braucht, um einen vorher eingestellten Kontrast zu erkennen.

Das folgende Blockschaltbild soll die Funktion der elektronischen Steuerung veranschaulichen.

Blockschaltbild zur Funktionsweise der elektronischen Schaltung:



3.4 Versuchsdurchführung

Der Versuchsleiter hat nun die Aufgabe, für eine bestimmte Versuchssituation den Schwellenwert ΔL zu finden, den die Vp gerade noch von L unterscheiden kann. Die Unterschiedsschwelle ist diejenige Leuchtdichtedifferenz, die in 50 % der Fälle noch erkannt wird. Im "Grenzverfahren" nähert man sich der Schwelle entweder von einem überschwelligen Wert (absteigendes Verfahren) oder vom sicher unterschwelligen Wert (aufsteigendes Verfahren). Üblicherweise meint man mit "Unterschiedsschwelle" hierbei diejenige, die im "aufsteigenden Verfahren" gewonnen wurde (TRAXEL, 1964).

Im Konstanzverfahren wird kein sich in bestimmter Richtung ändernder Leuchtdichteunterschied verwendet, sondern es wird eine Reihe einzelner Leuchtdichten (L, $L + \Delta L$) in zufälliger Reihenfolge dargeboten, die den gesuchten Schwellenwert mit einschließt (TRAXEL, 1964).

Wir haben meist das Grenzverfahren angewendet. Die Schwelle wurde durch abwechselndes aufsteigendes und absteigendes Verfahren eingegrenzt, analog dem Verfahren im halbautomatischen BÉKÉSY-Audiometer zur Ermittlung der Hörschwellenkurve (BÉKÉSY, 1947). Hin und wieder ist zur Absicherung der Schwelle noch zusätzlich das Konstanzverfahren verwendet worden. Durch Variation von L kann so in jeder Untersuchungssituation die charakteristische Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle von der Testfeldleuchtdichte bestimmt werden.

Der Versuchsleiter führt eine Liste über die richtigen und falschen Antworten der Versuchspersonen. Er trägt sie in eine Matrix ein, in der alle Kombinationen der Filterstellungen des rechten und linken Projektors enthalten sind . (Eine zusätzlich entwickelte elektronische Anzeige zeigt die jeweilige Stellung des Magazins an).

3.5 Auswertung

Das Versuchsprotokoll gibt die Filterstellung an der Schwelle wieder, die der jeweiligen Leuchtdichte des Testfeldes entspricht. Diese Leuchtdichte ist aber erst aus der jeweiligen Filterstellung zu entnehmen. Mit dem Pritchard-Photometer ist für alle Filter der Schwächungsfaktor bestimmt worden, der sich direkt auf die Testfeldleuchtdichte bezieht. Ausgehend vom filterfreien Strahlengang brauchen wir dann bei einer Änderung der Lampenleuchtdichte, wie sie sich durch Alterung oder Auswechseln ergibt, nicht alle Filterkombinationen aufs neue durchzumessen, sondern es genügt, den jeweiligen Abschwächungsfaktor mit der neuen Ausgangsleuchtdichte zu multiplizieren.

Ferner ist für das Testfeld noch der Einfluß von Streulicht zu berücksichtigen. Da die Adaptometerhalbkugel nahezu wie eine Ulbrichtkugel wirkt, hat die Testfeldöffnung ohne eingeschaltete Projektoren schon eine gewisse Leuchtdichte. Das durch das Umfeld erzeugte Streulicht beträgt im Testfeld etwa 0.4% der Umfeldleuchtdichte. Dieser Wert ist zu der jeweiligen Testfeldleuchtdichte hinzuzuaddieren. Aus diesem Streulichtfaktor ergibt sich allerdings, daß wir im Testfeld niemals Leuchtdichten niedriger als 0.4% der Umfeldleuchtdichte erzeugen können. Wie wir im Ergebnisteil sehen werden, ist dies auch gar nicht notwendig.

Zur Auswertung der Ergebnisse stand ein Wang-Rechner 720C mit einer Plotter-Schreibmaschine zur Verfügung. Mit Hilfe eines eigens hierzu entwickelten Programms werden aus den jeweiligen Eingaben der Filterstellungen unter Berücksichtigung der Ausgangsleuchtdichte und des Streulichtsfaktors die eigentlichen Leuchtdichtewerte L und ΔL errechnet. In einem weiteren, auch hierzu entwickelten Programm können diese Daten direkt auf der Plotter-Schreibmaschine graphisch aufgezeichnet werden.

3.6 Versuchspersonen

Vorversuche ergaben, daß die Ergebnisse sehr stark altersabhängig sind. Die vorliegende Untersuchung ist deshalb auf eine Altersgruppe beschränkt. Insgesamt sind die Versuche mit neun Versuchspersonen im Alter von 20 bis 25 Jahren durchgeführt worden. Sie sind alle normalsichtig mit einem Visus von mindestens 1.5 auf beiden Augen. Am Mesoptometer bei Blendung erkennen sie Kontraste, die über dem Durchschnitt liegen. Acht dieser Vpn stellen am Anomaloskop nach NAGEL die Normalengleichung ein. Vp Chr. stellt Protanopengleichung ein. Er hat eine erstaunliche Sehschärfe (Visus 2). Am Mesoptometer kann er dieselben Kontraste erkennen wie die anderen Versuchspersonen.

Die Versuche sind ebenfalls mit Vp Chr. durchgeführt worden. Es zeigt sich, daß das Kontrastsehen von Chr. teilweise von dem der übrigen Vpn abweicht.

3.7 Nomenklatur

In den bisherigen Betrachtungen war ΔL ein beliebiger Leuchtdichteunterschied im Testfeld. Im folgenden soll unter ΔL jedoch bereits die Unterschiedsschwelle gegenüber einer Testfeldleuchtdichte L verstanden werden (jnd: just noticeable difference).

Aus den Wertepaaren L und ΔL können die anderen gebräuchlichen Größen hergeleitet werden.

Zunächst soll der Begriff Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit (LUE) erweitert werden.

Die LUE ist üblicherweise definiert als

$$\text{LUE} := \frac{L_U}{\Delta L}\,, \qquad \text{Def. (1a)}$$

also als das Verhältnis von Umfeldleuchtdichte L_U zur zusätzlichen Leuchtdichte ΔL, die man zu L_U hinzufügen muß,

um sie gerade noch von der Umfeldleuchtdichte L_U unterscheiden zu können. In dieser Anordnung interessiert aber nur die Schwelle innerhalb des Testfeldes. Deshalb definieren wir analog

$$LUE := \frac{L}{\Delta L} , \qquad \text{Def. (1b)}$$

wobei L die Testfeldleuchtdichte bedeuten soll und ΔL den Zuwachs an Leuchtdichte über L hinaus in der einen Hälfte des Testfeldes, der gerade noch wahrgenommen werden kann (jnd).

Der Kehrwert der LUE wird häufig Kontrast (K) genannt.

$$K := \frac{\Delta L}{L} \qquad \text{Def. (2a)}$$

Die Definition (2a) ist ein Sonderfall für den Kontrast zweier beliebiger Leuchtdichten L_1 und L_2. Dort gilt

$$K := \frac{L_2 - L_1}{L_1} \qquad \text{Def. (2b)}$$

Wenn wir $L_1 = L$ und $L_2 = L + \Delta L$ setzen, so erhalten wir aus Def. (2b) die oben angegebene Kontrastdefinition (2a).

Die Kontrastdefinition nach (2b) ist zwar gebräuchlich, aber unbefriedigend. Der Kontrastwert ändert sich, wenn im Nenner L_1 durch L_2 ersetzt wird. Deshalb wird in der Theorie der Kontrastübertragung der Kontrast anders definiert:

$$K := \frac{L_2 - L_1}{L_2 + L_1} \qquad \text{Def. (3)}$$

Diese Größe gestattet zum Beispiel auch unmittelbar den "Kontrastumfang" eines Systems anzugeben. Es wird nur für L_1 und L_2 das jeweilige Leuchtdichteminimum bzw. -maximum eingesetzt.

Da wir Unterschiedsschwellen bestimmt haben, unterscheiden sich L_1 und L_2 um ΔL. Aus Def. (3) folgt dann

$$K = \frac{\Delta L}{2L + \Delta L} = \frac{1}{2 \cdot LUE + 1} .$$

Wir können also aus der Unterschiedsschwelle ΔL und der LUE nach Def. (1b) die übrigen, auch gebräuchlichen Größen berechnen. Es werden deshalb im folgenden nur die Unterschiedsschwellen ΔL selbst und noch der Begriff LUE verwendet.

4. Ergebnisse

4.1 Verhalten der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_U, foveal

4.1.1 Photopischer Bereich

Die Ergebnisse der Messungen im photopischen Bereich, foveal, sind bereits teilweise veröffentlicht (LINGELBACH und HABERICH, 1977) und werden hier nur der Vollständigkeit halber noch einmal wiedergegeben.

a) Einfluß der Größe des Testfeldes

Zunächst wurde der Verlauf der LUE bei fester Umfeldleuchtdichte L_U und verschiedener Testfeldgröße foveal gemessen.

Die Unterschiedsempfindlichkeit ist umso größer, je größer der Sehwinkel ist. Als Beispiel ist in Abb. 7 der Verlauf der LUE für die Umfeldleuchtdichte L_U = 10 cd/m^2 dargestellt. Es fällt auf, daß die Kurven der LUE in dem gemessenen Bereich weitgehend parallel verlaufen. Die weiteren Untersuchungen sind deshalb bei konstanter Testfeldgröße (1^o) durchgeführt worden.

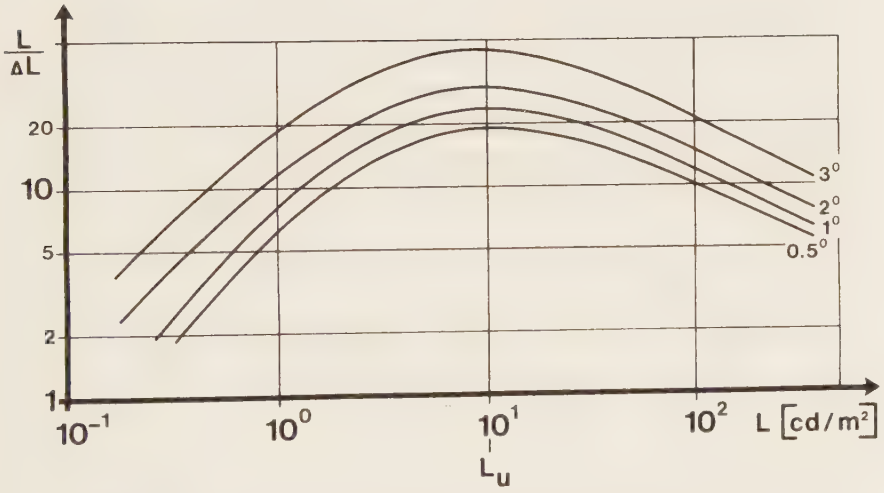


Abb. 7. Verlauf der LUE (Ordinate) als Funktion der Leuchtdichte L (cd/m^2) bei Adaptation an eine Umfeldleuchtdichte L_U = 10 cd/m^2 für die Testfeldgrößen 0.5°, 1°, 2°, und 3°

b) Verhalten der Leuchtdichteunterschiede (ΔL) als Funktion konstanter Umfeldleuchtdichten L_U bei konstanter Testfeldgröße (1^o)

In Abb. 8 ist für eine Einzelmessung (L_U = 0.44 cd/m^2, Testfeldgröße 1^o) direkt ΔL gegen L aufgetragen. Unterhalb einer Leuchtdichte von 0.1 cd/m^2 erreicht ΔL einen konstanten Schwellenwert (ΔL_s), der gerade noch von "schwarz", also L = 0, unterschieden werden kann. Allgemein wird ΔL_s erreicht bei Testfeldleuchtdichten L, die etwa 1/10 der jeweiligen Adaptationsleuchtdichte L_U betragen (siehe auch Abb. 9). Die Vp hat in diesem Bereich unabhängig von L die gleiche Helligkeitsempfindung, nämlich "subjektiv schwarz". Zu höheren Leuchtdichten hin steigt die Schwelle ΔL an und wird im doppelt - logarithmischen Maßstab proportional zu L.

Der einfachste mathematische Ansatz zur Beschreibung der Kurve nach Abb. 8 lautet

$$\Delta L = \Delta L_s + b \cdot L^c \qquad (1)$$

Der Wert für ΔL_s ergibt sich unmittelbar aus dem Mittelwert von ΔL für den Bereich L kleiner L_U. Für L größer als L_U kann

$$\Delta L = b \cdot L^c \qquad (2)$$

gesetzt werden, da dann ΔL_s vernachlässigbar klein gegen ΔL ist. Die Konstante c bedeutet graphisch die Steilheit des Kurvenabschnittes im Bereich von Leuchtdichten größer als die Umfeldleuchtdichte L_U. Die Konstante b kennzeichnet die vertikale Verschiebung der Kurven im gleichen Bereich bei verschiedenen L_U.

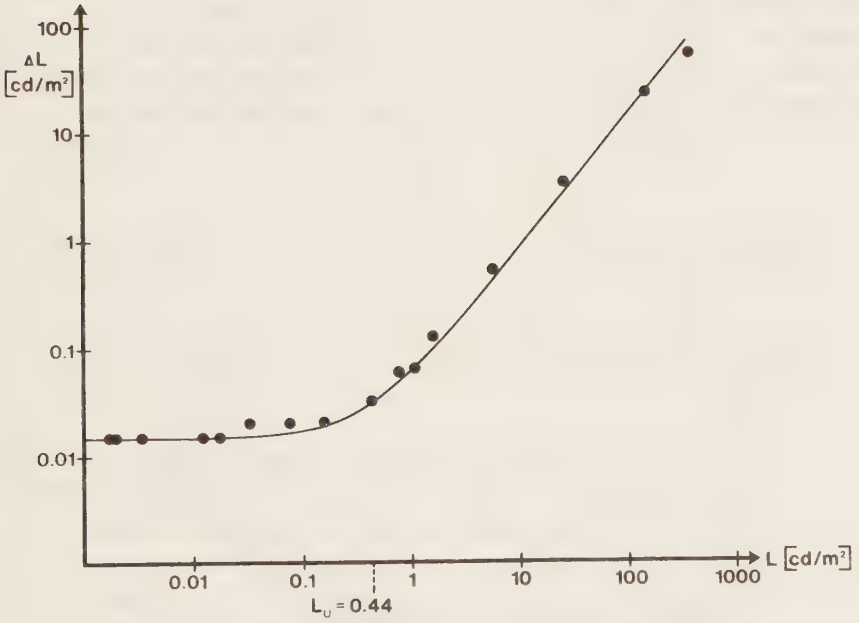


Abb. 8. Die Unterschiedsschwelle (ΔL) in Abhängigkeit von der Leuchtdichte (L) bei Adaptation an $L_U = 0.44$ cd/m² (Einzelmessung, Vp.: Jü)

Für den Gültigkeitsbereich nach Formel (2) können aus den Meßdaten nach der Umformung

$$\log \Delta L = \log b + c \log L \qquad (3)$$

mit der üblichen Korrelations- und Regressionsrechnung die Konstanten b und c bestimmt werden.

Im photopischen Bereich sind für 6 verschiedene Umfeldleuchtdichten L_U die Unterschiedsschwellen ΔL in Abhängigkeit von der Leuchtdichte L bestimmt worden. Jede Einzelkurve läßt sich nach Formel (1) beschreiben. Abb. 9 stellt die aus den ent-

sprechenden Versuchsdaten errechneten Kurven dar. Die ΔL_s - Werte wurden durch Mittelwertsbildung der jeweiligen experimentellen ΔL-Werte ermittelt, die Parameter b und c nach den Formeln (2) und (3). Als Bestätigung für die Beziehung nach Formel (3) ergaben sich Korrelationskoeffizienten zwischen log ΔL und log L, die fast ausnahmslos größer als 0.99 ($r^2 > 0.98$) sind!

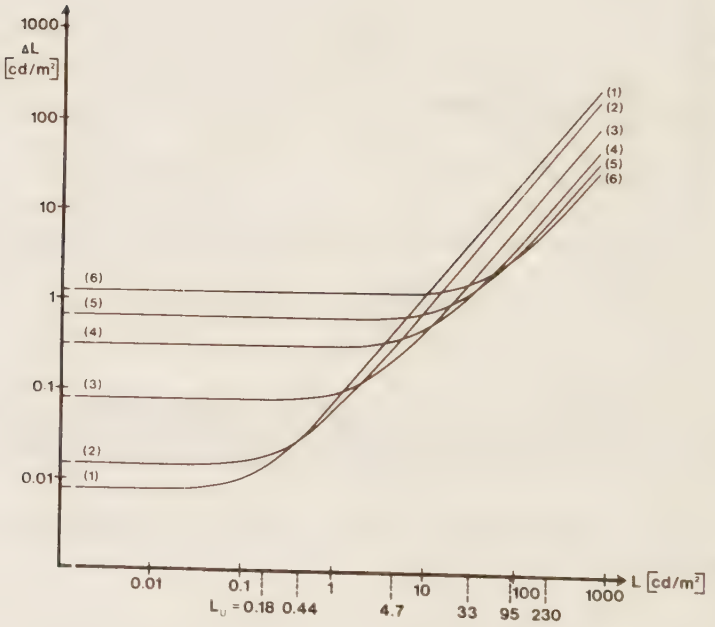


Abb. 9. ΔL in Abhängigkeit von L für die Adaptationsleuchtdichten L_U = (1) 0.18 cd/m², (2) 0.44 cd/m², (3) 4.7 cd/m², (4) 33 cd/m², (5) 95 cd/m², (6) 230 cd/m². Zur Erhaltung der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung der Einzelmeßwerte verzichtet.

c) Analyse der Kurven der Unterschiedsempfindlichkeit (entsprechend Abb. 9)

Bei Betrachtung von Abb. 9 fällt auf, daß

1. der Wert ΔL_s mit L_U ansteigt und somit auch der Bereich des "subjektiven Schwarz",

2. die Kurven sich an einer Stelle der Leuchtdichte L überschneiden, die umso höher liegt, je mehr die Umfeldleuchtdichte L_U ansteigt. Danach verlaufen die Kurven parallel. Diese Überschneidung bringt es mit sich, daß bei höherem L_U die Unterschiedsschwelle ΔL für Leuchtdichten oberhalb von L_U kleiner wird.

Der Parameter c steigt im photopischen Bereich mit L_U schwach an. Die Zunahme der Steigung ist aber so gering und die Korrelation so schwach, daß in diesem Bereich (L_U zwischen 0.18 cd/m^2 und 230 cd/m^2) c als konstant angesehen werden kann. Der Mittelwert beträgt 1.25 mit einer Standardabweichung von 0.09. Wir haben daraufhin c = 1.25 gesetzt.

Trägt man im doppelt-logarithmischen Maßstab b als Funktion der Adaptationsleuchtdichte (= Umfeldleuchtdichte L_U) auf, so nimmt log b offensichtlich proportional mit anwachsendem log L_U ab (Abb. 10 a). Dies ist der mathematische Zusammenhang, der das oben bereits erwähnte Kleinerwerden der ΔL mit steigendem L_U beschreibt. Die Korrelations- und Regressionsrechnung ergibt

$$b = 0.036 \cdot L_U^{-0.3} \qquad (r = 0.98,\ r^2 = 0.96) \qquad (4)$$

Trägt man in gleicher Weise ΔL_s als Funktion von L_U auf (Abb. 10b), so ergibt sich ein linearer Anstieg von ΔL_s mit steigendem L_U. Aus der Rechnung folgt

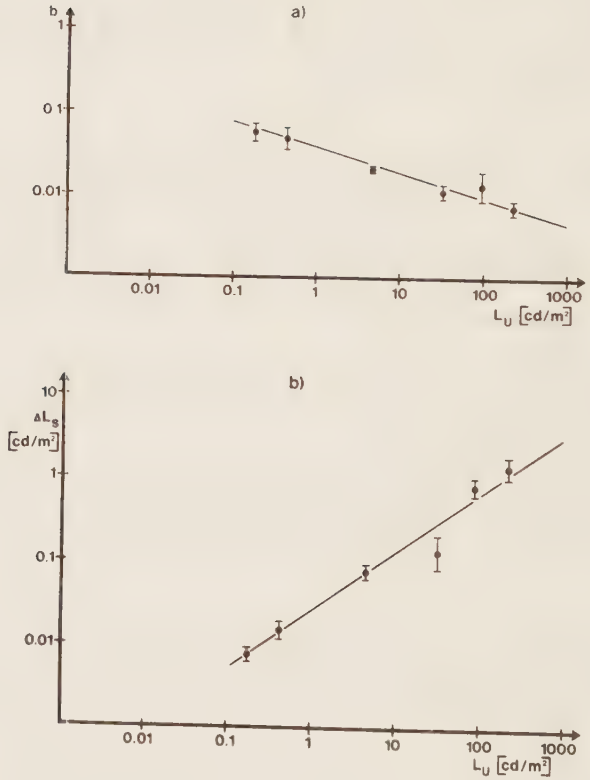


Abb. 10. a) Abhängigkeit des Parameters b von der Umfeldleuchtdichte L_U (Formel 4)

b) ΔL_s in Abhängigkeit von L_U (Formel 5) (Mw. und St.A. aus jeweils 8 bis 15 Einzelwerten)

$$\Delta L_s = 0.025 \cdot L_U^{0.705} \quad (r = 0.98,\ r^2 = 0.96) \qquad (5)$$

Für den photopischen Bereich kann bei Kenntnis der Adaptationsleuchtdichte L_U die foveale Unterschiedsschwelle bei einem Testfeld von 1° in einer einzigen Formel gemäß (1) unter Benutzung von (4) und (5) dargestellt werden:

$$\Delta L = 0.025 \cdot L_U^{0.705} + 0.036 \cdot L_U^{-0.30} \cdot L^{1.25} \qquad (6)$$

Nach Formel (6), die - wie wir zeigen konnten - mit großer Genauigkeit die experimentell gefundenen Daten und Zusammenhänge erfaßt, läßt sich nicht nur die Kurvenschar nach Abb. 9 berechnen, sondern z. B. auch das Verhältnis $\frac{L}{\Delta L}$ bestimmen, die LUE nach Def. (1b).

In Abb. 11 ist in einer räumlichen Darstellung $\frac{L}{\Delta L}$ in Abhängigkeit von L und L_U aufgetragen. Von niedrigen Testfeldleuchtdichten L aufsteigend, wächst die LUE bis zu einem Maximum und fällt wieder ab. Das Maximum der LUE steigt mit wachsender Adaptationsleuchtdichte (L_U) deutlich an.

Das Maximum entspricht praktisch den statisch gemessenen Werten der Unterschiedsempfindlichkeit in der Kurve von KÖNIG-BRODHUN (Abb. 2a). Zum Vergleich sind die Werte der LUE (skotopischer und photopischer Bereich) in Abb. 38 zusammen mit der KÖNIG-BRODHUN-Kurve für $L = L_U$ dargestellt. Wegen des größeren Testfeldes bei KÖNIG & BRODHUN liegen unsere Daten unterhalb der KÖNIG-BRODHUN-Kurve.

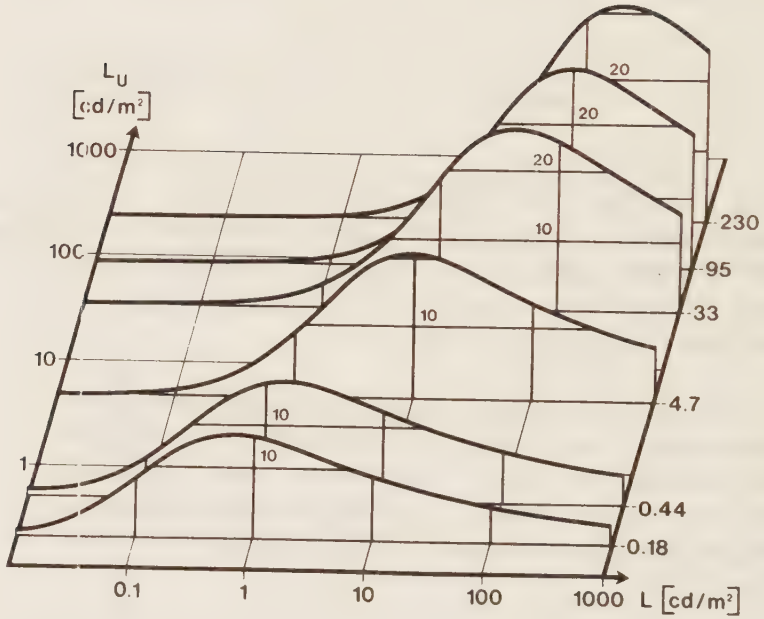


Abb. 11. Räumliche Darstellung der Unterschiedsempfindlichkeit $L/\Delta L$ in Abhängigkeit von der Leuchtdichte L für die 6 Adaptationsleuchtdichten L_U nach Abb. 9

d) Verhalten der LUE bei einem Protanopen

Wie bereits bemerkt, ist Vp Chr. ein Protanoper. Lediglich für ihn fanden wir bei der Analyse der Versuchsdaten signifikante Unterschiede zu den anderen, farbnormalen Vpn.

Diese Unterschiede bestehen darin, daß ΔL_s als Funktion von L_U zwar auch geradlinig verläuft, jedoch eine größere Steilheit besitzt als Abb. 10b entsprechend. Es kommt zu einer Überschneidung der beiden Geraden bei $L_U \approx 5$ cd/m^2. Hieraus läßt sich folgern, daß dieser Protanope unterhalb dieser Adaptationsleuchtdichte eine gegenüber den Normalfarbsichtigen niedrigere ΔL_s hat, oberhalb jedoch eine höhere ΔL_s. Auch für die Konstante b - entsprechend Abb. 10a - ergibt sich eine flachere Gerade, die ebenfalls die "Normalkurve" kreuzt.

Diese signifikanten Unterschiede bedeuten praktisch für den Protanopen eine gegenüber dem "Normalen" bessere LUE bei niedrigen Adaptationsleuchtdichten L_U (< 1 cd/m^2) und eine schlechtere LUE bei höheren L_U (> 10 cd/m^2).

4.1.2 Skotopischer Bereich

Im skotopischen Bereich ist für einige Umfeldleuchtdichten L_U die Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle ΔL von der Testfeldleuchtdichte L gemessen worden. Abb. 12 und 13 zeigen typische Einzelmessungen.

Für $L \gg L_U$ wird ΔL im log-log-Maßstab proportional zu L.

Für große L gilt also wie im photopischen Bereich:

$$\Delta L = b \cdot L^c \qquad (7)$$

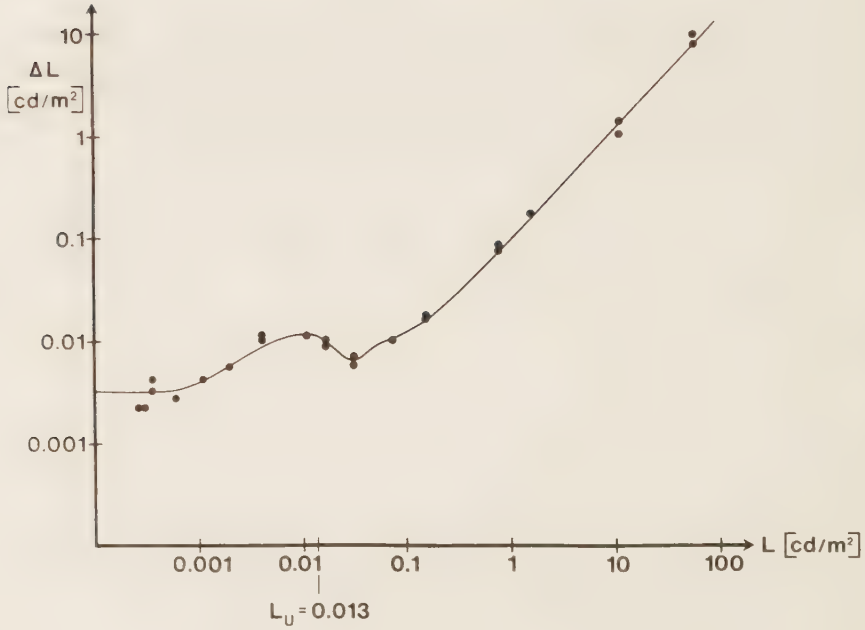


Abb. 12. Die Unterschiedsschwelle ΔL in Abhängigkeit von der Leuchtdichte L bei Adaptation an L_U = 0.013 cd/m² (Einzelmessung. Vp.: L.W.)

Parameter c ist mit durchschnittlich c = 1.1 geringfügig kleiner als im photopischen Bereich. Die vorher erwähnte leichte Zunahme der Steigung im photopischen Bereich findet sich auch hier. Sie bewirkt den Anschluß vom skotopischen an den photopischen Bereich.

Zu niedrigeren L hin läuft ΔL nicht wie im photopischen Bereich sofort in eine Konstante aus. Zunächst sinkt ΔL weiter ab, um dann im Bereich $L \approx L_U$ wieder anzusteigen. Erst zu noch niedrigeren Werten L hin läuft die Kurve in eine Konstante aus, die wir wieder ΔL_s genannt haben.

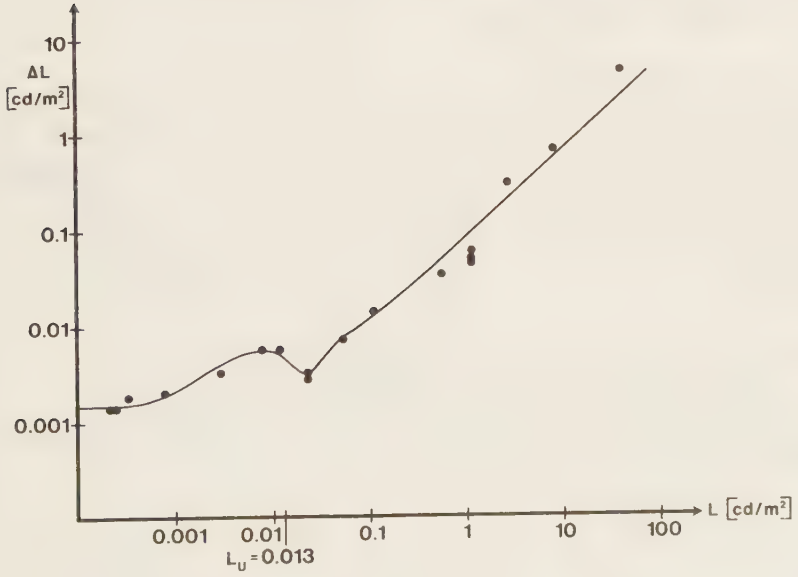


Abb. 13. wie Abb. 12. Vp.: Do

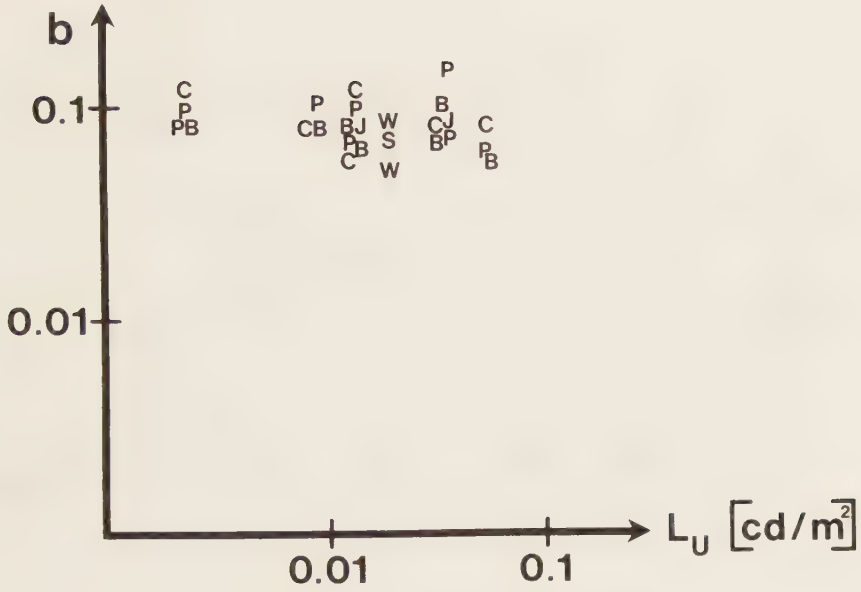
Es zeigt sich, daß der Parameter ΔL_s im skotopischen Bereich, foveal, zu niedrigeren Leuchtdichten L_U hin nicht mehr weiter abnimmt, sondern praktisch konstant bleibt. Dasselbe ergibt sich für Parameter b, der auch nicht über 0.1 steigt. In Abb. 14a und b sind die Werte b und ΔL_s für die verschiedenen Vpn im skotopischen Bereich aufgetragen.

Es ist besonders schwierig, im skotopischen Bereich foveal zu beobachten. Man neigt unbewußt dazu, nicht zentral zu fixieren, sondern "vorbeizusehen", also parafoveal zu beobachten. Obwohl unsere Vpn sehr gut trainiert sind, liegt hierin sicher ein Grund für die große interindividuelle Streuung bei den ΔL_s- Werten. Im Gegensatz dazu streuen die b-Werte nur wenig. Der Berechnung des b-Wertes liegen dementsprechend auch Testfeldleuchtdichten L zugrunde, die teilweise bereits im photopischen Bereich liegen!

Vp Chr. ist die protanope Versuchsperson. In Abb. 14 b können wir erkennen, daß seine ΔL_s- Werte deutlich unter dem jeweiligen Mittelwert der gesamten Meßdaten liegen (Meßwerte C). Insgesamt liegen die Werte für Vp Chr. auch auf einer Kurve und streuen damit weniger, als bei den übrigen Vpn. Dies entspricht auch dem Befund, den wir für Chr. schon vom photopischen Bereich her kennen.

Aus Abb. 14a und b ergibt sich die Fortsetzung der Verläufe von b und ΔL_s aus Abb. 10 in den skotopischen Bereich. In Abb. 15 a und b sind b und ΔL_s für L_U aus dem Leuchtdichteintervall 0.001 bis 100 cd/m^2 dargestellt.

a)



b)

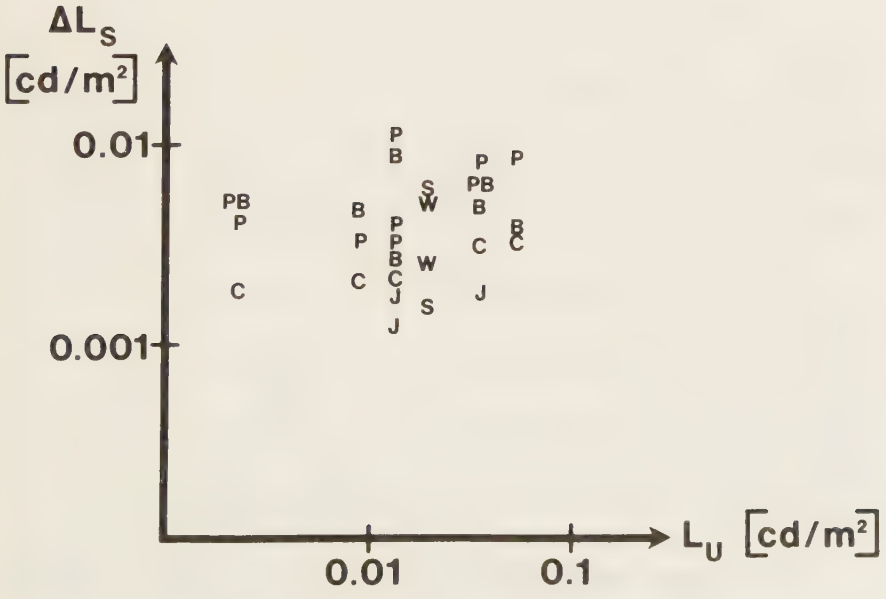
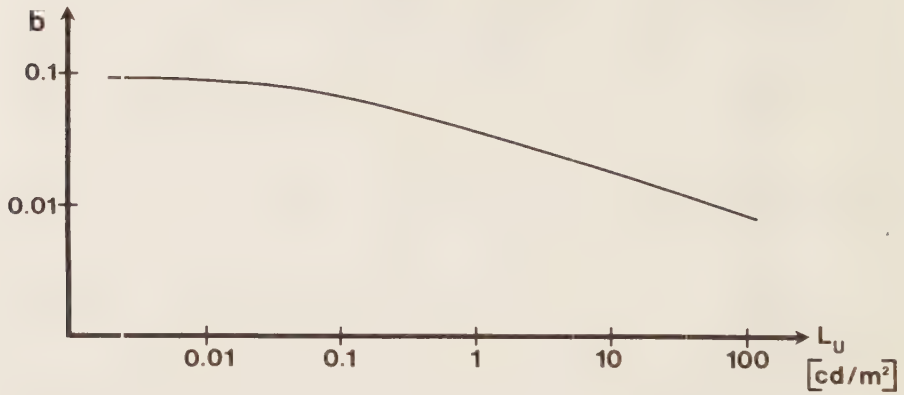


Abb. 14. a) Parameter b im skotopischen Bereich (Jeder Buchstabe bedeutet den Meßwert für eine Vp)

b) ΔL_S im skotopischen Bereich

a)



b)

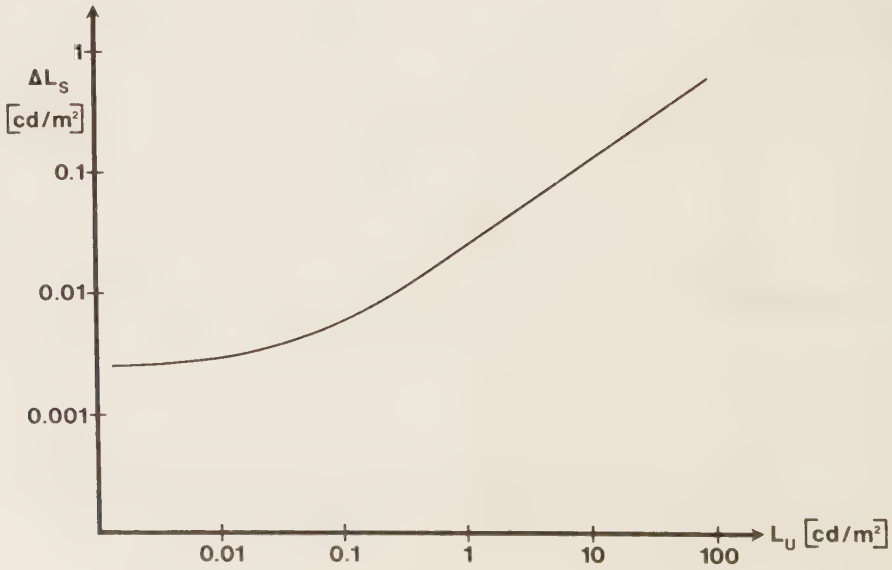


Abb. 15. Parameter b (a) und ΔL_S (b) in Abhängigkeit von der Umfeldleuchtdichte L_U (nach Abb. 10 und 14)

Mit Hilfe der Kurven 15 a und b kann eine vollständigere Darstellung der LUE-Kurven gegeben werden.

In Abb. 16 sind für die Umfeldleuchtdichten L_U = 0.01, 0.1, 1, 10, 100 cd/m² die jeweiligen LUE-Kurven dargestellt. Die Zunahme des Maximums der LUE mit der Umfeldleuchtdichte ist deutlich zu erkennen. Besonders aber fällt auf, daß sich mit der Umfeldleuchtdichte auch die Lage des Maximums relativ zu L_U verschiebt. Für L_U = 0.01 cd/m² und 0.1 cd/m² liegt das Maximum der LUE-Kurve deutlich oberhalb von L_U. Zu höheren Umfeldleuchtdichten hin verschiebt sich das Maximum immer weiter nach links. Bei L_U = 100 cd/m² liegt es sogar schon unterhalb L = 100 cd/m². Der Übergangsbereich, etwa bei L_U = 0.1 cd/m², in dem sich die Lage des Maximums nicht mehr ändert, stellt den Übergang vom photopischen zum skotopischen Sehen in der Fovea dar.

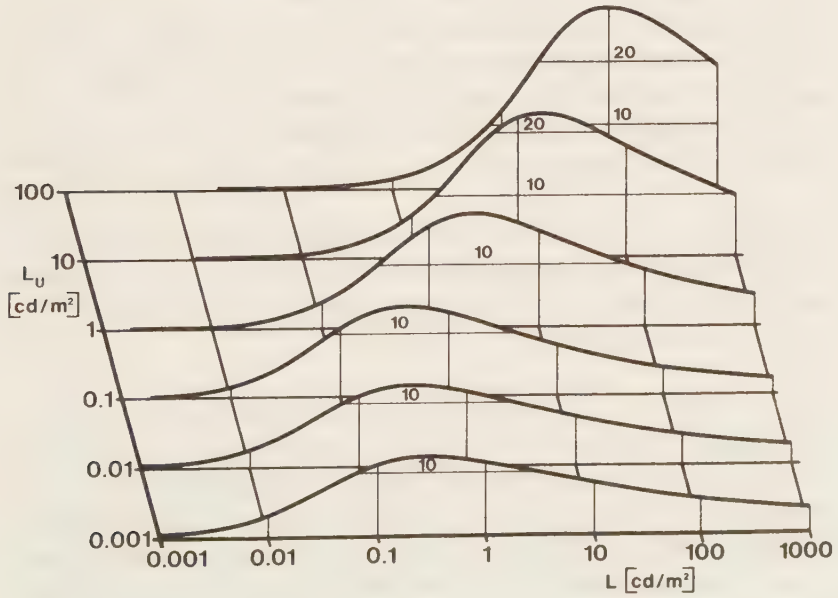


Abb. 16. Räumliche Darstellung der Unterschiedsempfindlichkeit L/ΔL in Abhängigkeit von der Leuchtdichte L für die Adaptationsleuchtdichten L_U = 0.01, 0.1, 1, 10, 100 cd/m²

4.2 Verhalten der Leuchtdichteunterschiedsschwelle ΔL bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_U, parafoveal

Der Begriff "parafoveal" wird in der Literatur unterschiedlich verwendet. Einmal ist damit nur die unmittelbare Umgebung der Fovea gemeint, dann aber auch wieder die innere Peripherie. Hier sollen unter "parafoveal" noch die Netzhautorte bis 12° außerhalb der Fovea verstanden werden.

4.2.1 Testfeldgröße 2°, Netzhautort 6° temporal

Für die Untersuchung im parafovealen Bereich wurde eine zusätzliche Fixiermarke in der Adaptometerhalbkugel angebracht. Die Fixiermarke besteht aus 4 roten, quadratisch angeordneten Punkten. Der Punktabstand beträgt diagonal 1°. Die Fixiermarke darf nicht aus einem einzigen Punkt bestehen, da dann wegen der schnell eintretenden Lokaladaptation unweigerlich Fixationsblindheit in der Peripherie auftreten würde (TROXLER - Effekt). Die Vpn sollten abwechselnd die einzelnen Punkte fixieren.

Die Testfeldgröße mußte auf 2° vergrößert werden. Es ist zur Unterscheidung der beiden Testfeldhälften schon eine gewisse Sehschärfe notwendig, und peripher nimmt die Sehschärfe bekanntlich stark ab.

In Abb. 17 und 18 sind Einzelmessungen dargestellt. Wir finden einen ähnlichen Verlauf der Kurven wie im skotopischen Bereich foveal. Allerdings ist hier die Abweichung von einer glatten Kurve entsprechend Abb. 8 nicht so ausgeprägt. Hierzu tragen auch schon die größeren Streuungen der Meßwerte im parafovealen Bereich bei. In Abb. 18 fällt noch der weite Bereich der linearen Zunahme des Schwellenwertes ΔL mit der Testfeldleuchtdichte L auf. Dieser Bereich erstreckt sich praktisch über 4 Zehnerpotenzen bei einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0.99$ ($r^2 = 0.98$).

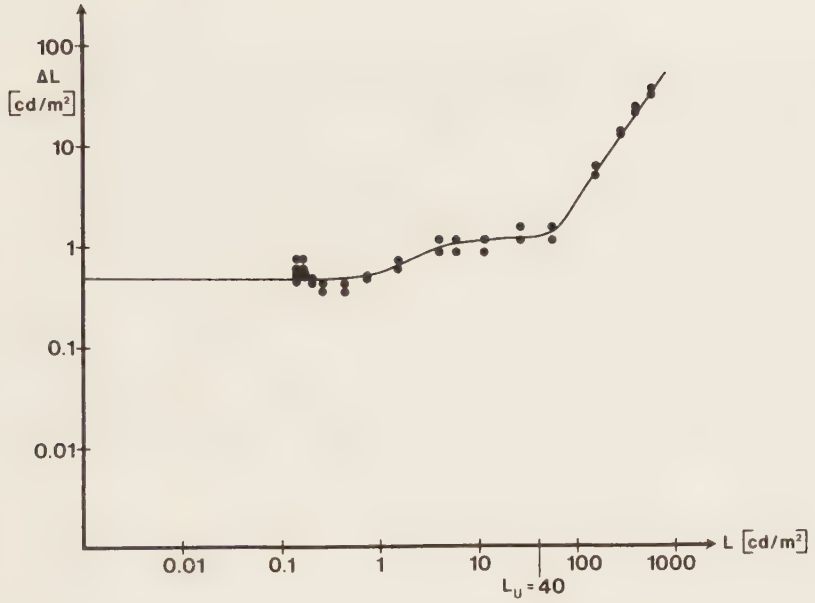


Abb. 17. ΔL in Abhängigkeit von L für L_U = 40 cd/m^2. (Testfeld 6° temporal) Einzelmessung. Vp.: Br.

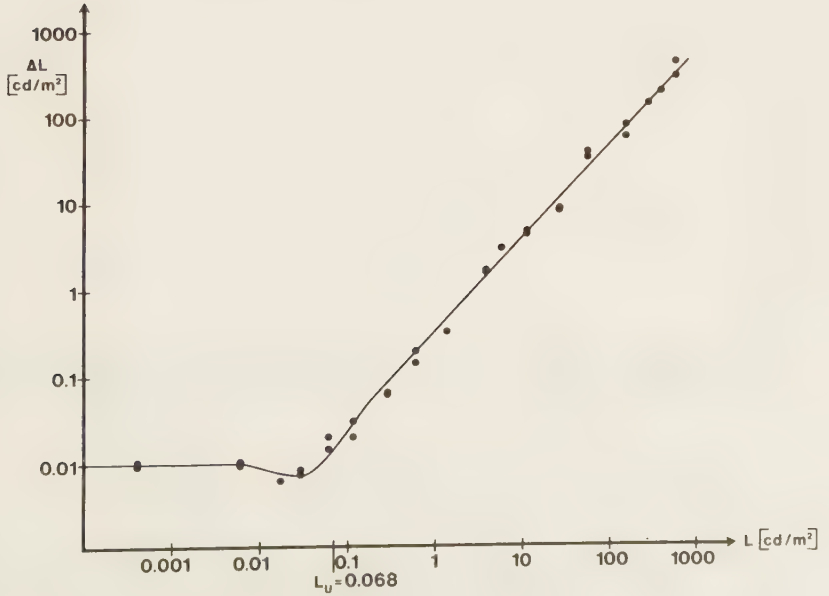


Abb. 18. wie 17). L_U = 0.068 cd/m^2. Vp.: LW.

Für die Einzelmessung ergeben sich bei allen Vpn gewöhnlich wieder Korrelationskoeffizienten von immer noch $r > 0.95$ ($r^2 > 0.9$) für den linearen Teil. Es sollen hier aber jetzt nicht alle Einzelmessungen aufgeführt werden. Wir wollen vielmehr wieder versuchen, einen Zusammenhang der Parameter ΔL_s, b und c, welche den Verlauf der Einzelkurven entsprechend Gl (1) festlegen, mit der Umfeldleuchtdichte L_U herzustellen.

In Abb. 19 a bis c sind die Parameter c, b und ΔL_s in Abhängigkeit von L_U aufgetragen. Die Meßwerte sind durch die Anfangsbuchstaben der Namen der Vpn gekennzeichnet. In dieser Art der Darstellung läßt sich sowohl die interindividuelle als auch die intraindividuelle Streuung erkennen.

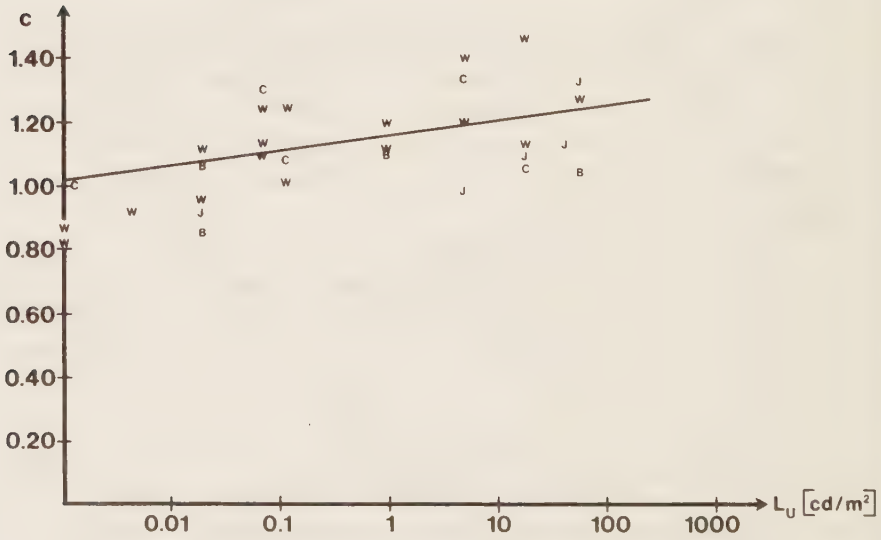
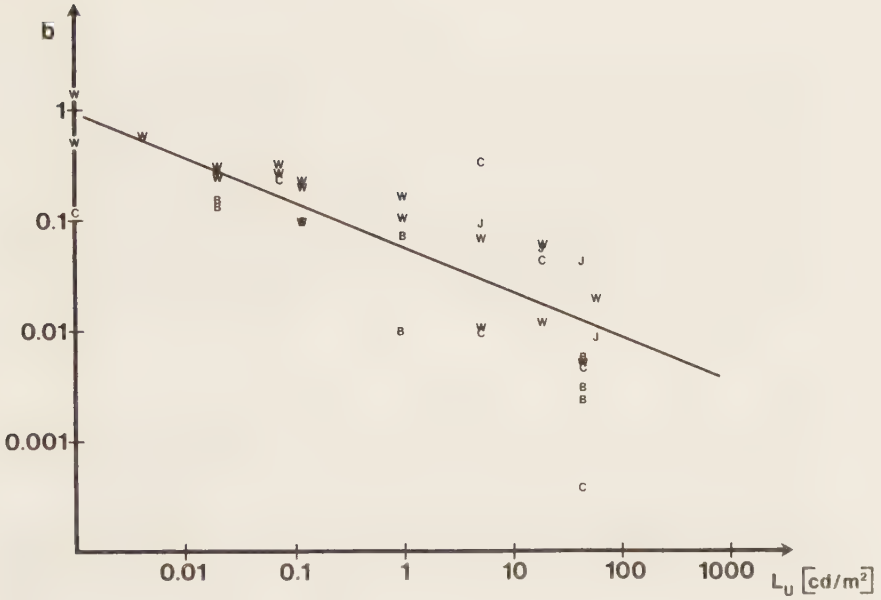


Abb. 19 a. Parameter c in Abhängigkeit von L_U. Testfeldgröße 2^o. Beobachtung 6^o temporal.

b)



c)

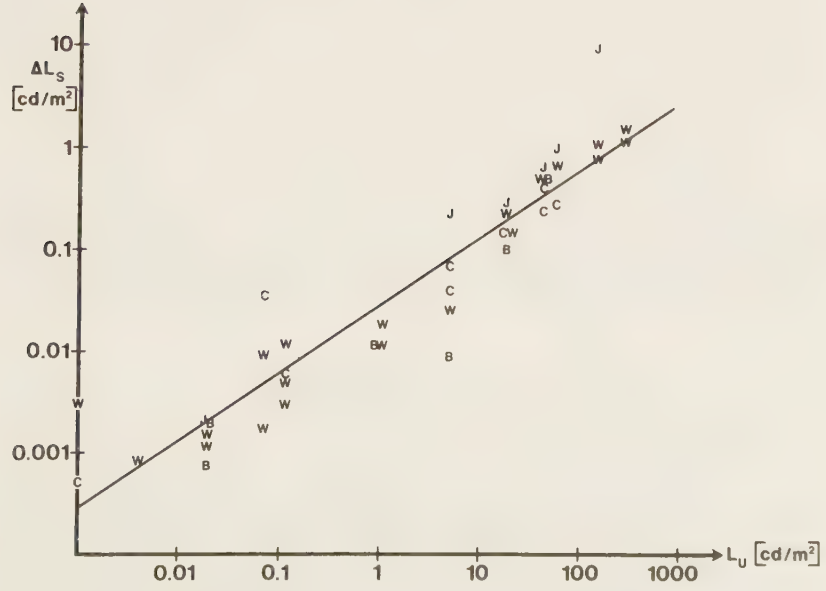


Abb. 19 b. und c. Parameter b (b) und ΔL_S (c) in Abhängigkeit von L_U (Testfeldgröße 2^o. Beobachtung 6^o temporal).

Für Parameter c (Abb. 19a) scheint eine besonders große Streuung vorzuliegen. Betrachten wir aber nur die Meßwerte jeweils einer Vp, so lassen sich diese Einzelwerte offensichtlich recht gut durch entsprechende Kurven angleichen. Für Vp W z.B. wäre eine steilere Gerade als die eingezeichnete eine bessere Näherung gewesen. Lediglich für Vp C (=Chr.) scheint sich Parameter c in keiner erkennbaren Funktion von L_U darstellen zu lassen, seine Werte liegen aber innerhalb des Gesamtstreubereichs.

Man muß sich aber auch klarmachen, daß im Bereich einer Steigung von 45^o ($\tan \alpha = 1$) eine Änderung der Steigung um 0.1 nur einen Unterschied von ca. 2^o im Steigungswinkel der Einzelkurve (etwa von Abb. 17, 18) bewirkt. Dieser Unterschied macht sich in der gezeichneten Regressionsgeraden kaum bemerkbar. Deshalb meinen wir, daß die in 19a eingezeichnete Regressionsgerade eine brauchbare Näherung für die Abhängigkeit des Parameters c von der Umfeldleuchtdichte L_U darstellt. Der Korrelationskoeffizient fällt hier natürlich sowieso besonders niedrig aus ($r = 0.33$, $r^2 = 0.11$), weil die Zunahme von c mit L_U gering ist. Die Regressionsgerade in 19a hat die Gleichung

$$c = 1.15 + 0.049 \cdot \log L_U \qquad (8)$$

In der gleichen Weise ist Parameter b in Abb. 19b aufgetragen. Wir finden für die Meßwerte aller Vpn mit $r = 0.8$ ($r^2 = 0.64$) schon eine brauchbare Korrelation. Die Regressionsgleichung für Parameter b lautet

$$\log b = - 1.28 - 0.4 \log L_U \qquad (9)$$

bzw. nach b aufgelöst:

$$b = 0.0525 \cdot L_U^{-0.4} \qquad (10)$$

Damit liegt Parameter b für die 6^o temporale Netzhautstelle in dem untersuchten Leuchtdichtebereich deutlich oberhalb der entsprechenden fovealen b-Werte, wie sich aus dem Vergleich von Gl. (10) mit Gl. (4) ergibt. Insbesondere haben wir nicht das

flachere Auslaufen der Kurve zu niedrigen L_U hin, wie es in Abb. 15a dargestellt ist.

Für ΔL_s ergibt sich der in Abb. 19c gegebene Zusammenhang. Auch hier fällt sofort der lineare Verlauf im gesamten Bereich auf. Bei niedrigen Umfeldleuchtdichten L_U liegt die Schwelle ΔL_s weit unter den entsprechenden Werten für die Fovea. Die Korrelationsrechnung ergibt bei Berücksichtigung der Meßwerte aller Vpn

$$\Delta L_s = 0.03 \cdot L_U^{0.67} \qquad (11)$$

mit $r = 0.94$ ($r^2 = 0.88$) .

Diese Funktion für ΔL_s weicht praktisch kaum von der im photopischen Bereich gefundenen ab (siehe Gl.5). Die Abweichung in der Steigung beträgt nur 1^o, die Abweichung des "Achsenabschnittes" mit 0.005 liegt ebenfalls innerhalb der Streubreite. Der Unterschied liegt wieder darin, daß (11) auch im skotopischen Bereich gültig ist.

Mit diesen drei Gleichungen ((8), (10), (11)) läßt sich (für diese Versuchsanordnung) die Unterschiedsempfindlichkeit des Auges 6^o temporal der Fovea für jede Umfeldleuchtdichte und jede Testfeldleuchtdichte angeben. Es ist noch zu bemerken, daß für Vp Chr. im peripheren Bereich der Netzhaut keine signifikanten Unterschiede zu den übrigen Vpn zu finden sind.

Es läßt sich nun ebenfalls die LUE nach Gl. (8), (10), (11) in Abhängigkeit von L und L_U berechnen (Abb. 20).

Es zeigt sich, daß die im skotopischen Bereich gegenüber den fovealen verbesserten ΔL_s-Werte keineswegs den Gewinn an Unterschiedsempfindlichkeit bringen, den man sich vielleicht erhofft hat. Erst zu höheren L_U -Werten hin steigt die LUE an und wird ab etwa $L_U = 1\ cd/m^2$ vergleichbar mit der fovealen LUE (dort allerdings bei der Testfeldgröße 1^o!).

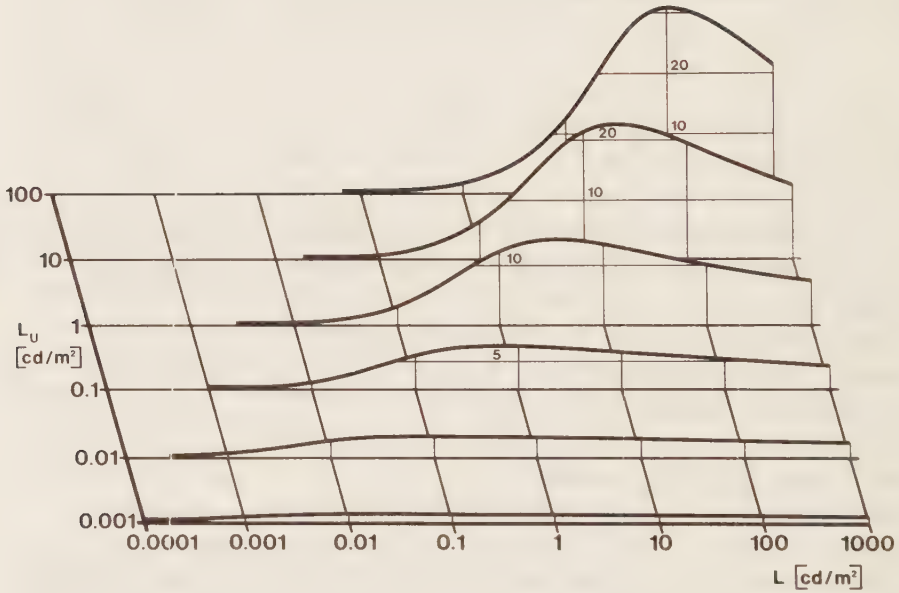


Abb. 20. Räumliche Darstellung der LUE in Abhängigkeit von der Leuchtdichte L für die Adaptationsleuchtdichten L_U = 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 cd/m². Beobachtung 6° temporal, Testfeldgröße 2°.

4.2.2 Testfeldgröße 2^{o}, Netzhautort 12^{o} temporal

In Abb. 21 und 22 sind wieder zwei Einzelmessungen dargestellt. Der unregelmäßige Verlauf der Kurven im Bereich von der Umfeldleuchtdichte L_U tritt nicht mehr so deutlich auf.

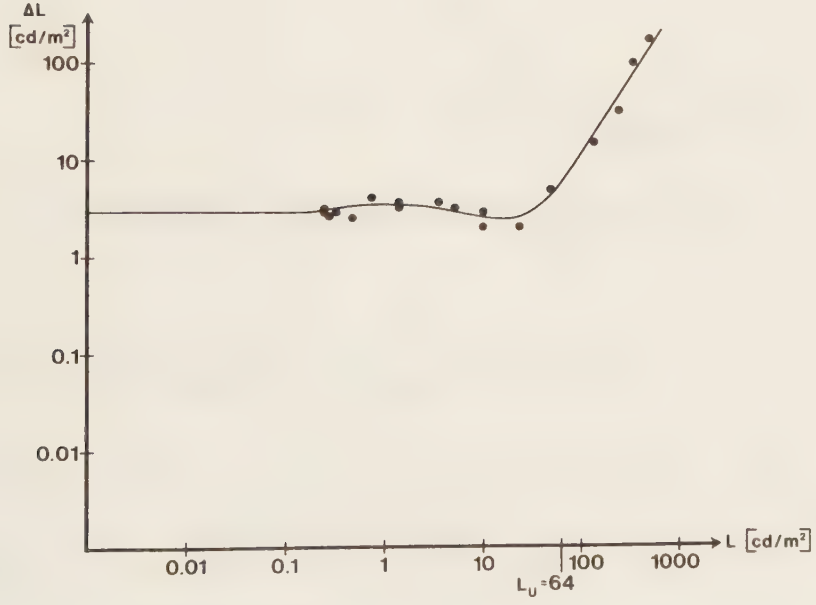


Abb. 21. ΔL in Abhängigkeit von L für die Adaptationsleuchtdichte L_U = 64 cd/m². Beobachtung 12^{o} temporal. Testfeldgröße 2^{o}. (Einzelmessung, Vp.: Br)

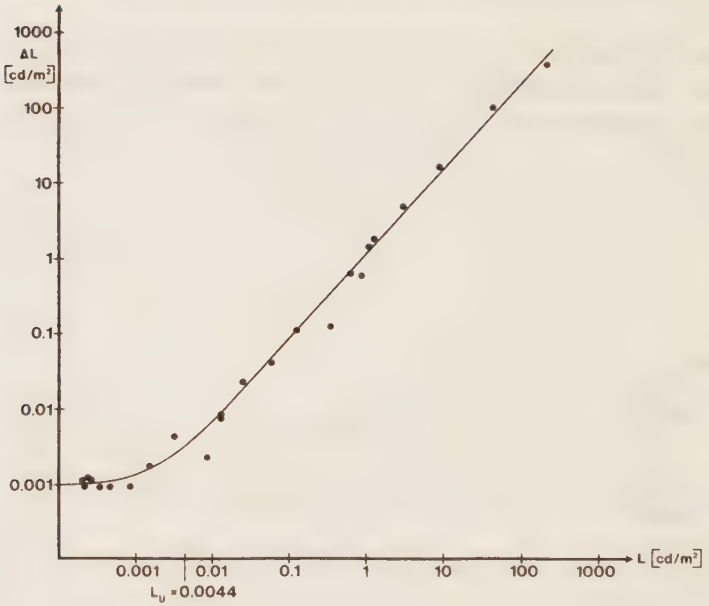


Abb. 22. ΔL in Abhängigkeit von L für die Adaptationsleuchtdichte L_U = 0.0044 cd/m². Netzhautort 12° temporal. Testfeldgröße 2° (Einzelmessung, Vp.: Br)

In Abb. 21 ist dieser Effekt noch angedeutet, meistens verlaufen die Kurven aber ähnlich der Abb. 22. Für den linearen Teil ergeben sich Korrelationskoeffizienten von $r \geq 0.95$ ($r^2 \geq 0.9$), meistens ist r sogar größer als 0.98 ($r^2 \geq 0.96$).

Es soll gleich die Abhängigkeit der Parameter c, b, und ΔL_s von der Umfeldleuchtdichte L_U untersucht werden.

In Abb. 23a, b und c sind die entsprechenden Werte für alle Vpn aufgetragen. Die Meßdaten sind jeweils durch den Anfangsbuchstaben des Namens der Vp gekennzeichnet.

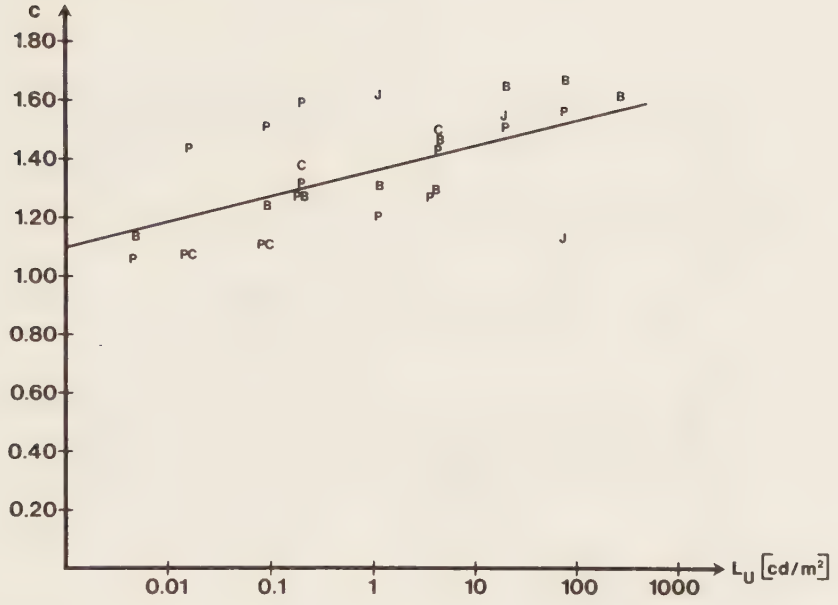


Abb. 23 a) Parameter c in Abhängigkeit von L_U. 12° temporal. (Die Buchstaben bezeichnen die Meßwerte der einzelnen Vpn)

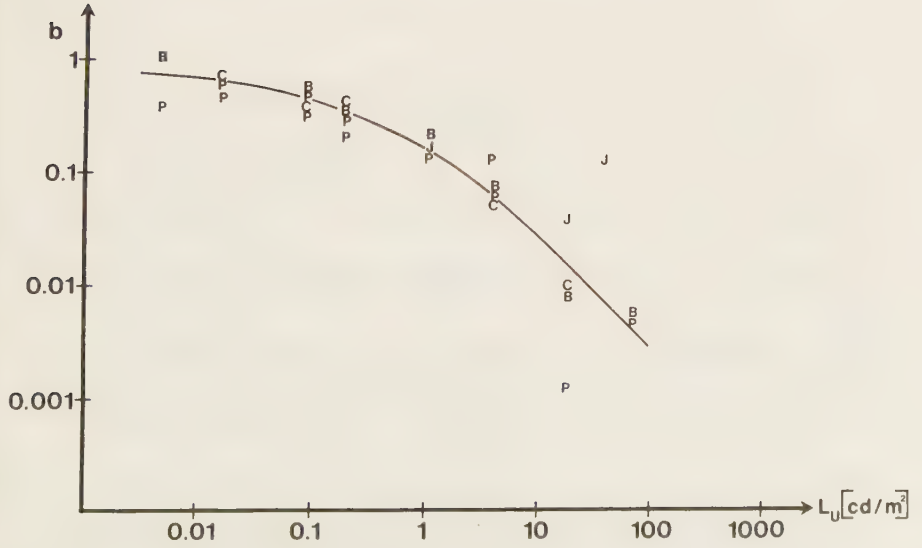


Abb. 23 b) Parameter b in Abhängigkeit von L_U. 12° temporal.

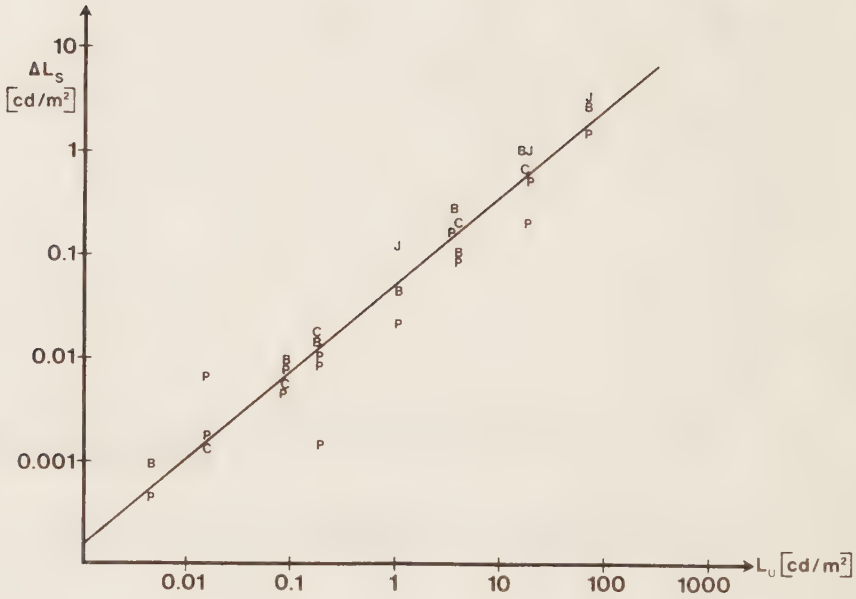


Abb. 23 c) ΔL_s in Abhängigkeit von L_U. 12° temporal

Parameter c (Abb. 23a) steigt hier erheblich mit L_U an. Es folgt

$$c = 1.35 + 0.09 \cdot \log L_U \qquad (12)$$

Sogar der Korrelationskoeffizient hat schon den Wert r = 0.6. Die Streuungen sind zwar immer noch groß, aber die steigende Tendenz für den Wert c bleibt ohne jeden Zweifel erhalten.

Für Parameter b (Abb. 23b) läßt sich keine Regressionsgerade mehr angeben. b erreicht nahezu den Wert 1 im skotopischen Bereich und fällt dann steiler ab bis etwa 0.0017 für L_U = 100 cd/m².

Für die Abhängigkeit der ΔL_s-Werte von L_U erhalten wir einen linearen Zusammenhang in dem untersuchten Bereich. (Abb. 23c). Die Rechnung ergibt

$$\Delta L_s = 0.053 \cdot L^{0.844} . \qquad (13)$$

Der Korrelationskoeffizient berechnet sich immerhin zu $r = 0.97$ ($r^2 = 0.94$).

Die Gesamtdarstellung der hieraus berechneten LUE-Kurven (Formel (1), (12) und (13)) ist in Abb. 24 gegeben. Die jeweiligen b-Werte sind aus Abb. 23b abgelesen worden.

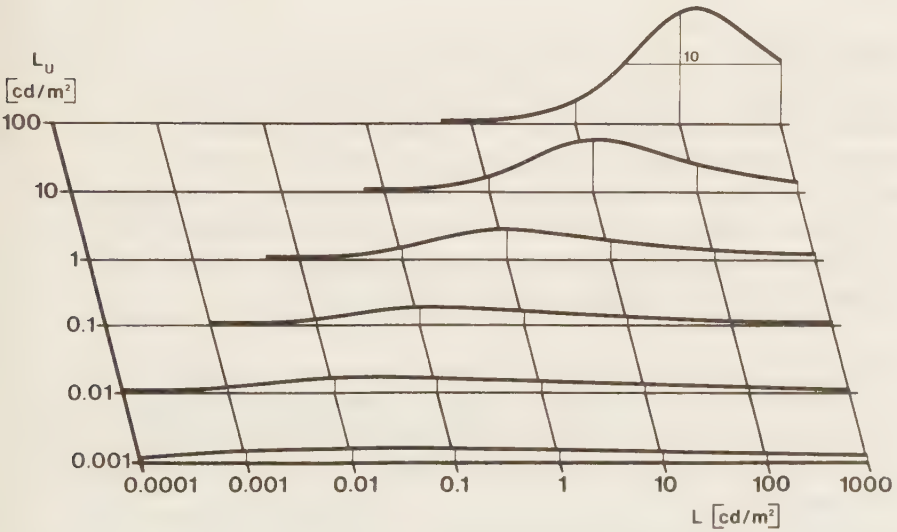


Abb. 24. Räumliche Darstellung der LUE in Abhängigkeit von der Leuchtdichte L für die Adaptationsleuchtdichten L_U = 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100 cd/m². Netzhautort 12° temporal. Testfeldgröße 2°.

4.3 Zeitlicher Verlauf der LUE nach einem Sprung der Adaptationsleuchtdichte im photopischen Bereich

4.3.1 Sprung in der Adaptationsleuchtdichte von einer hohen zu einer niedrigen Umfeldleuchtdichte

Bei 3 Vpn (E, D und W) ist der zeitliche Verlauf der Adaptation für einen Leuchtdichtesprung von L_{U_1} = 230 cd/m² nach L_{U_2} = 0.5 cd/m² bei einer Testfeldgröße von 2°, foveal, verfolgt worden. Die Ergebnisse für die 3 Vpn sind einander ähnlich. Zu den schon vorhandenen Streuungen bei konstantem Umfeld kommen jetzt aber noch die interindividuellen Streuungen in den Zeitverläufen dazu. Wir beschränken uns deshalb hier auf die Darstellung der Ergebnisse für eine Vp (Vp E).

Zunächst wird für die festen Umfeldleuchtdichten L_{U_1} = 230 cd/m² und L_{U_2} = 0.5 cd/m² die Abhängigkeit der Unterschiedsschwellen ΔL von der Testfeldleuchtdichte L gemessen. Anschließend wird der Versuchsablauf abgeändert. Die Vp soll sich zunächst an die Leuchtdichte L_{U_1} = 230cd/m² adaptieren. Dann wird plötzlich die Umfeldleuchtdichte auf L_{U_2} = 0.5 cd/m² umgeschaltet. Für die Vp beginnt nun die Umadaptationszeit t an die neue Leuchtdichte.

Nach der vorher eingestellten Zeit t wird das Testfeld für 0.4 sec freigegeben. Durch häufige Wiederholung und Variation der Testfeldleuchtdichte L wird so die Abhängigkeit der Schwelle ΔL von L zur Zeit t nach dem Leuchtdichtesprung bestimmt. Für die Zeit t = 0.1; 0.5; 1.5; 3 und 8 sec sind die entsprechenden Kurven aufgetragen (Abb. 26, 27).

In Abb. 25 ist eine Einzelmessung für t = 3 sec aufgetragen. Wir erkennen, daß die Form der Kurve unverändert ist. Sie kann wieder mit der bereits verwendeten Formel

$$\Delta L = \Delta L_s + bL^c \qquad (14)$$

beschrieben werden.

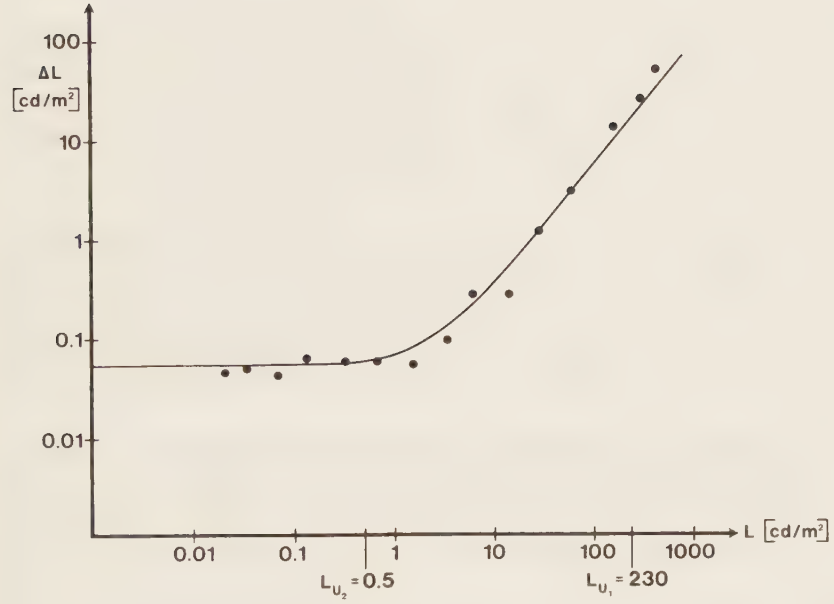


Abb. 25. Die Unterschiedsschwelle ΔL in Abhängigkeit von der Testfeldleuchtdichte L. Gemessen 3s nach einem Sprung in der Adaptationsleuchtdichte von $L_{U_1} = 230$ cd/m² nach $L_{U_2} = 0.5$ cd/m². Vp.: Ek

Es zeigt sich, daß Parameter c während der Umadaptation seinen Wert 1.25 beibehält. Die Umadaptation ist also durch das zeitliche Verhalten der Parameter ΔL_s und b festgelegt.

Abb. 26 zeigt die für Vp E insgesamt gemessenen Kurven. Es ist zu erkennen, wie sich die Adaptationskurve $\Delta L(L)$ unter Beibehaltung ihrer Form auf das neue Niveau schiebt. Es fällt aber sofort eine Asymmetrie auf: die Kurve für t = 8 sec deckt sich für kleine L nicht mit der Kurve für das konstante Umfeld $L_{U_2} = 0.5$ cd/m². Für L niedriger als L_{U_2} (in dem Fall also $L_{U_2} = 0.5$ cd/m²) dauert die Adaptation länger. Der Parameter

ΔL_s hat also einen anderen zeitlichen Verlauf als Parameter b.

In Abb. 28 ist das Verhalten von ΔL_s dargestellt. Erst nach über 10 sec ist der neue Wert erreicht.

Aus den Daten für die Unterschiedsschwellen ΔL läßt sich die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit LUE ($= \frac{L}{\Delta L}$) berechnen. Die Verschiebung der LUE-Kurve ist in Abb. 30 in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Man erkennt den zunächst schnellen und dann langsameren Verlauf der Adaptation. Das von BAKER (1955, 1963) beschriebene "Unterschwingen" der Unterschiedsschwelle nach einem Leuchtdichtesprung kann bei diesen relativ kleinen Sprüngen ($\approx$2.8 Dekaden) offenbar noch nicht beobachtet werden.

4.3.2 Sprung in der Adaptationsleuchtdichte von einer niedrigen zu einer höheren Umfeldleuchtdichte

Diese Versuchsreihe wurde ebenfalls mit 3 Vpn durchgeführt (Vp S, D, W). Wir möchten uns aus den gleichen Gründen, wie eben dargelegt, auf die Darstellung der Ergebnisse bei einer Vp (Vp W) beschränken.

Die Kurven der Unterschiedsempfindlichkeit, die zu bestimmten Adaptationszeiten t gehören, haben den bekannten Verlauf. Sie lassen sich ebenfalls mit den Parametern ΔL_s, b und c beschreiben. Auch hier schwankt der Parameter c nur statistisch um einen Mittelwert. Es kann wieder c = 1.25 gesetzt werden. Der Verlauf der Adaptation ist auch hier durch die Zeitabhängigkeit der Parameter ΔL_s und b gegeben.

In Abb. 27 sind alle gemessenen Kurven zusammengefaßt.

Es gibt einen grundsätzlichen Unterschied zu dem zeitlichen Verlauf der Adaptation bei dem Sprung in die umgekehrte Richtung. Unmittelbar nach der plötzlichen Veränderung der Adaptationsleuchtdichte erreicht ΔL_s Werte, die größer sind als der Endwert. Man könnte dieses Verhalten von ΔL_s als

"overshoot-Phänomen" auffassen. Dieses Verhalten gilt jedoch offenbar nur für $L \leq L_{U_2}$.

Für höhere L hingegen bewegt sich der lineare Teil der Kurve wie in dem vorangehend geschilderten Leuchtdichtesprung erst schnell, dann langsamer in die Richtung der neuen Lage. Insgesamt ist der Adaptationsvorgang in diese Richtung bereits nach etwa 3 bis 5 sec. abgeschlossen.

Die Konsequenz dieser Verläufe von ΔL auf das Verhalten der LUE ist in Abb. 31 analog zu Abb. 30 dargestellt. Unmittelbar nach dem Leuchtdichtesprung springt auch das Maximum der LUE auf den neuen Wert, ist aber noch sehr niedrig. Die LUE steigt dann aber schnell an auf den endgültigen Wert.

Dieses "overshoot-Phänomen" für den Parameter ΔL_s ist gesondert untersucht worden, indem dieser Versuch mit einer gegenüber der Umfeldbeleuchtung L_U niedrigen Testfeldhelligkeit L wiederholt wurde.

Wir finden für ΔL_s den Verlauf, wie er in Abb. 29 wiedergegeben ist. Zunächst hat ΔL_s den zu der Umfeldleuchtdichte 0.5 cd/m^2 gehörenden Wert. Mit dem Sprung in der Umfeldleuchtdichte (Zeit t = 0) springt ΔL_s über den neuen ΔL_s-Wert hinaus und nähert sich ihm von oben.

Um den Einfluß der Pupille auf dieses Überschwingen zu bestimmen, wurde dieser Teil der Untersuchung mit einer künstlichen Pupille (ϕ 2 mm) wiederholt. In der Tat fällt hier das Überschwingen geringer aus und ist sogar nicht immer zu finden. Die Streuungen sind bei dieser Versuchsanordnung allerdings besonders groß.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde von einer niedrigen Umfeldleuchtdichte ausgehend die Sprungweite zu der neuen Adaptationsleuchtdichte in kleinen Schritten vergrößert. Wenn L_{U_2} nicht viel höher ist als L_{U_1}, finden wir dieses Überschwingen nicht. Erst wenn L_{U_2} etwa 1.5 - 2.5 Zehnerpotenzen oberhalb L_{U_1} liegt, tritt dieses overshoot-Phänomen auf.

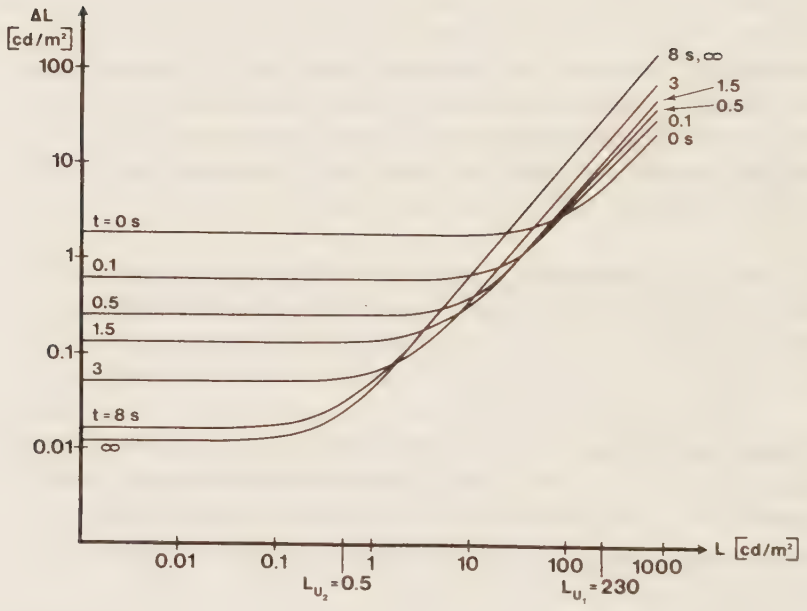


Abb. 26. Verschiebung der Unterschiedsschwelle ΔL in Abhängigkeit von L nach einem Umfeldleuchtdichtesprung von L_{U_1} = 230 nach L_{U_2} = 0.5 cd/m^2. Gemessen zu den Zeiten 0.1, 0.5, 1.5, 3 und 8s nach dem Sprung. Die Kurven 0 s und ∞ bezeichnen den Verlauf der Schwelle bei den festen Umfeldleuchtdichten L_{U_1} bzw. L_{U_2} (Die Kurven sind an die empirischen Daten angepaßt entsprechend Abb. 25).

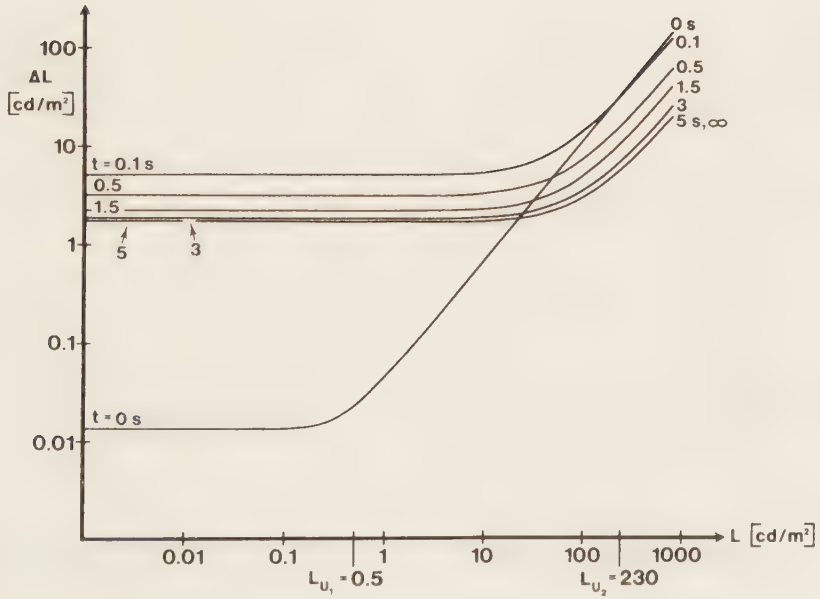


Abb. 27. Verschiebung von ΔL in Abhängigkeit von L nach einem Sprung in der Umfeldleuchtdichte von L_{U_1} = 0.5 nach L_{U_2} = 230 cd/m^2. Gemessen zu den Zeiten t = 0.1, 0.5, 1.5, 3 und 5 s nach dem Sprung. Die Kurven 0 s und ∞ bezeichnen den Verlauf der Schwelle bei den festen Umfeldleuchtdichten L_{U_1} bzw. L_{U_2}.

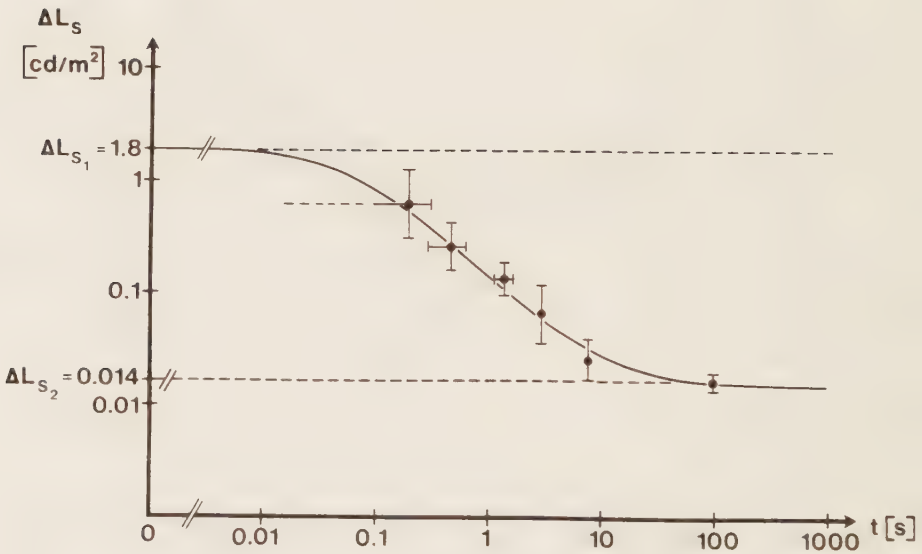


Abb. 28. Zeitlicher Verlauf von ΔL_s nach einem Sprung in der Adaptationsleuchtdichte von $L_{U_1} = 230$ nach $L_{U_2} = 0.5$ cd/m^2 (Mittelwert und Standardabweichung aus jeweils 8 bis 15 Messungen).

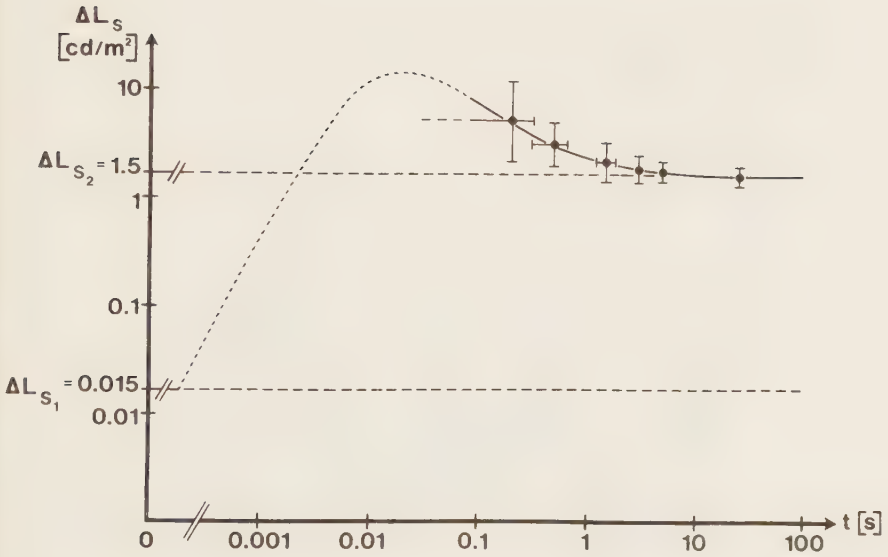


Abb. 29. Zeitlicher Verlauf von ΔL_s nach einem Sprung in der Adaptationsleuchtdichte von $L_{U_1} = 0.5$ nach $L_{U_2} = 230$ cd/m^2 (Mittelwert und Standardabweichung wie Abb. 28).

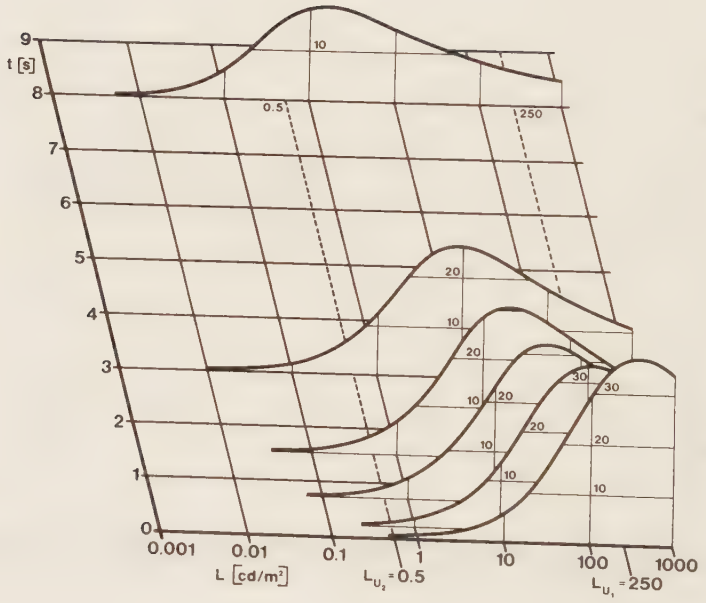


Abb. 30. Räumliche Darstellung der zeitlichen Verschiebung der LUE nach einem Umfeldleuchtdichtesprung von L_{U_1} = 230 nach L_{U_2} = 0.5 cd/m^2. Gemessen zu den Zeiten 0.1, 0.5, 1.5, 3 und 8s nach dem Sprung. Die Kurve bei t = 0 s entspricht dem Verlauf der LUE bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_{U_1}.

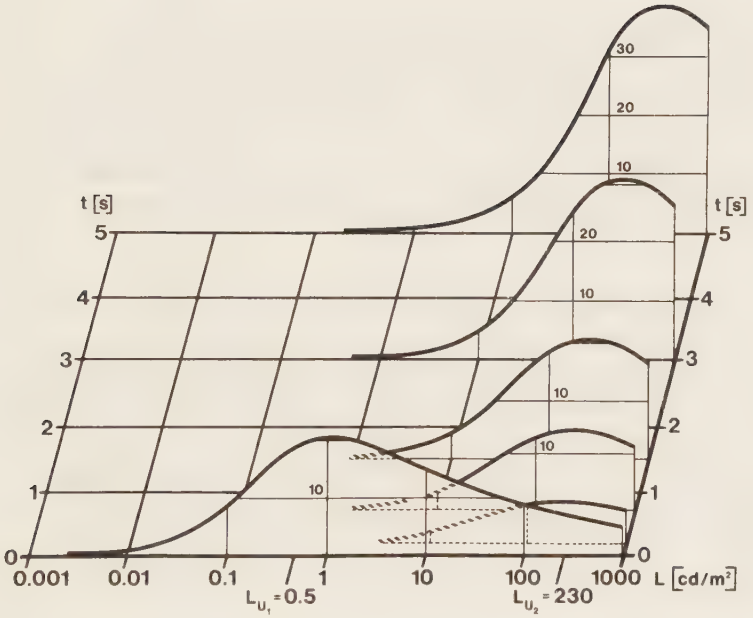


Abb. 31. Räumliche Darstellung der zeitlichen Verschiebung der LUE nach einem Sprung in der Umfeldleuchtdichte von L_{U_1} = 0.5 nach L_{U_2} = 230 cd/m^2. Gemessen zu den Zeiten t nach dem Sprung wie in Abb. 29

4.4 Tagesgang

Bei der Frage, ob die bisher untersuchten Phänomene der Adaptation einem Tagesgang (circadiane Rhythmik) unterliegen, wurde der Verlauf von ΔL_s nach einem Sprung der Umfeldleuchtdichte zu einer höheren Adaptationsleuchtdichte bei einigen Vpn verfolgt.

Die Umfeldleuchtdichte L_{U_1} betrug 0.016 cd/m^2 und L_{U_2} = 34 cd/m^2. Die Vp adaptierte sich zunächst an L_{U_1} (10 min.) und anschließend wurde die Schwelle für eine Testfeldleuchtdichte L sehr niedrig gegen L_{U_1} bestimmt (ΔL_{s_1}). Darauf wurde direkt nach dem Sprung von L_{U_1} nach L_{U_2} die Schwelle ΔL_s gemessen und schließlich noch der zu L_{U_2} gehörende ΔL_s-Wert (ΔL_{s_2}) ermittelt.

In dieser Form läßt sich der Versuch in 30 min. durchführen. Der Tagesgang wurde insgesamt an 6 Vpn bestimmt. Die Vpn verbrachten den gesamten Tag in einem Zimmer mit künstlicher Beleuchtung und hatten sonst keine besonderen Beschränkungen in Bezug auf die Tätigkeiten ihres Tagesablaufs (lesen, schreiben etc). Es wurden lediglich extreme Beleuchtungsbedingungen vermieden. Alle 3 - 4 Stunden wurde der Versuch durchgeführt. Einfache vegetative Parameter wie Puls, Blutdruck, Temperatur wurden zur Kontrolle mitgemessen.

Die interindividuellen Streuungen sind erheblich. Es lassen sich nur die Ergebnisse jeweils einer Vp interpretieren. In Abb. 32 und 33 sind die zeitlichen Verläufe von ΔL_s für die Vpn D und S aufgetragen. Der Versuch selbst lief jeweils von 9 Uhr bis 10 Uhr des folgenden Tages. Zur Kontrolle sind also noch die ersten Anschlußwerte mitgemessen worden.

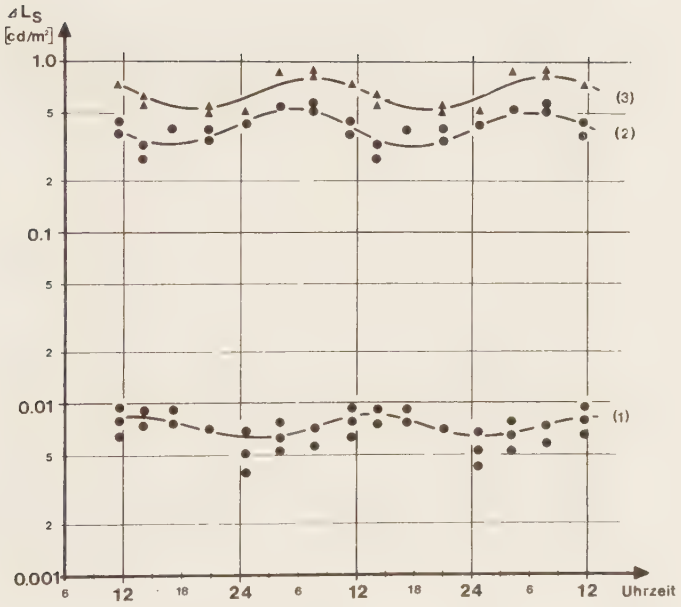


Abb. 32. Tagesgang von ΔL bei Adaptation an L_{U_1} = 0.016 (1), L_{U_2} = 34 cd/m² (2) und direkt nach einem Sprung von L_{U_1} nach L_{U_2} gemessen (3). Die Meßdaten sind über 2 Tage aufgetragen, um evtl. vorhandene Perioden deutlicher zu erkennen. Vp.: Do

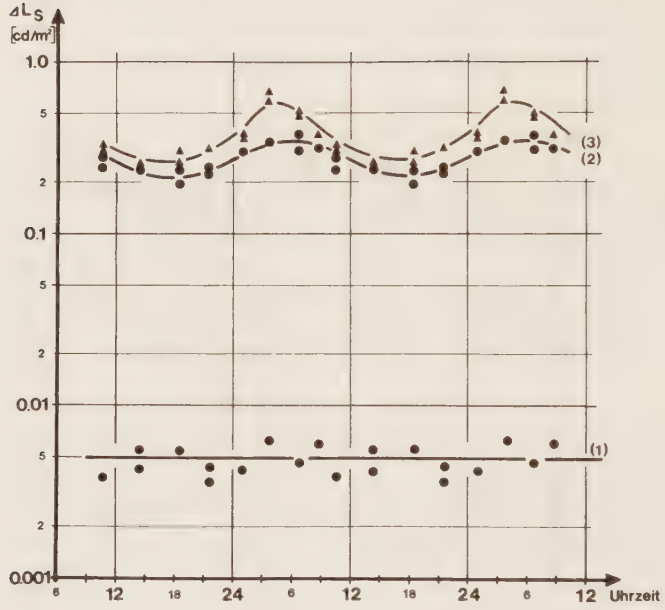


Abb. 33. wie Abb. 32. Vp.: Si

Aus diesen Darstellungen können leicht die Tagesgänge für die 3 gemessenen Größen abgelesen werden.

Bei Adaptation an L_{U_1} (Kurve 1) ist in Abb. 32 nur schwer, in Abb. 33 gar kein Tagesgang erkennbar, während die Tagesrhythmik ΔL_s bei Adaptation an L_{U_2} (Kurve 2) deutlich ist. Am Nachmittag durchläuft ΔL_s (Kurve 2) ein flaches Minimum und steigt in der Nacht leicht an.

Diese Verläufe für ΔL_{s_1} und ΔL_{s_2} finden sich mehr oder weniger ausgeprägt und teilweise auch phasenverschoben bei allen Vpn. Ein deutlicher Tagesgang liegt bei allen Vpn für die dritte Größe vor, also für ΔL_s direkt nach dem Sprung von L_{U_1}

nach L_{U_2} (Kurve (3)) . Während auch am Tage dieser Wert ΔL_s mitunter dicht an ΔL_{s_2} herankommt, wird in der Nacht der Abstand größer. Die Vpn empfinden den Sprung von L_{U_1} = 0.016 cd/m² zu der nicht sonderlich hellen Umfeldleuchtdichte L_{U_2} = 34 cd/m² schon als Blendung. (34 cd/m² ist eine Leuchtdichte, die man tagsüber - in dieser Versuchsanordnung - niemals als Blendung empfinden würde) Bei allen Vpn ist das Überschwingen von ΔL_s über den Wert ΔL_{s_2} hinaus am ausgeprägtesten zwischen 24 Uhr und 6 Uhr morgens. Nachts sind wir besonders blendempfindlich.

5. Diskussion

5.1 Verhalten der Leuchtdichteunterschiedsschwellen bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_U, foveal

Eine Diskussion der Ergebnisse im photopischen Bereich, foveal, wurde bereits gegeben (LINGELBACH und HABERICH, 1977) und wird hier mit einigen Ergänzungen noch einmal dargestellt.

5.1.1 Photopischer Bereich

Die vorliegenden Ergebnisse von 4.1.1 sind zunächst eine Nachprüfung der Untersuchungen von RANKE (1953) und KERN (1953). KERN hat ebenfalls den "Bereich der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges bei festgehaltenem Adaptationszustand" bestimmt. Sein Testfeld hatte eine Größe von 34' (gegenüber 1° bei uns), die Expositionszeit betrug 0.5 sec (gegenüber 0.4 bei uns). Der benutzte Leuchtdichtebereich L_U war 0.1 - 1000 Apostilb (asb). Hier wurde ein Bereich von 0.18 - 230 cd/m^2 benutzt, was 0.56 - 723 Apostilb entspricht.

a.) Vergleich mit den Ergebnissen von KERN

KERN fand 1. das Maximum der LUE bei der jeweils verwendeten Adaptationsleuchtdichte und 2. das absolute Maximum der LUE bei L_U = 1 asb.

ad. 1. Schon nach den Modellvorstellungen von RANKE (1953) über das Verhalten der dynamischen Kennlinien und der statischen Kennlinie bei der Bereichseinstellung des Auges ist an sich bereits aus theoretischen Gründen nicht zu erwarten, daß das Maximum der LUE bei der jeweiligen L_U liegt. Der Schnittpunkt der statischen Kennlinie mit den dynamischen Kennlinien liegt mit steigender L_U immer höher, d.h. man sollte das Maximum der LUE bei niedrigen L_U oberhalb und bei hohen L_U unterhalb von der jeweiligen L_U erwarten. Wir beziehen uns auf Abb. 113 von RANKE (1961), die in Abb. 34 mit eingezeichnet ist, bzw. schon in Abb. 3 vorgestellt wurde.

Aus den - nach den hier vorgelegten experimentellen Daten - mit großer Genauigkeit ermittelten funktionellen Zusammenhängen folgt:

$$LUE = \frac{L}{\Delta L} = \frac{L}{\Delta L_s + b \cdot L^c} \qquad (15)$$

Durch Differenzierung dieser Gleichung nach L und Null setzen - für $L = L_{Max}$ -, läßt sich die Lage des Maximums der LUE in Abhängigkeit von L_U berechnen unter Verwendung der im Ergebnisteil angegebenen Gleichungen (4 und 5), die ΔL_s und b als Funktion von L_U kennzeichnen. Es ergibt sich

$$L_{Max} = 2.26 \cdot L_U^{0.80} \qquad (16)$$

(L_{Max} = Leuchtdichte für die maximale LUE)

Stellt man L_{Max} einerseits als Funktion von L_U nach Formel (16) und andererseits nach den Ergebnissen von KERN, d. h. $L_{Max} = L_U$, graphisch dar, so ergeben sich 2 Geraden, die sich im Bereich von L_U = 10 - 100 cd/m^2 überschneiden. Unterhalb dieses Bereiches liegt die Gerade nach Formel (16) höher, oberhalb tiefer als die Gerade nach $L_{Max} = L_U$. Damit bestätigt Gleichung (16) die im vorangehenden Absatz dargestellten Ausführungen über die Lage des Maximums der LUE in Beziehung zur jeweiligen L_U.

Tatsächlich ist auch bereits dieser Befund in der Originalarbeit von KERN (1953) in dessen Abb. 1 zu erkennen, wo bei der niedrigen L_U von 0.1 asb das Maximum der LUE bei einer Leuchtdichte deutlich oberhalb von 0.1 asb liegt.

ad. 2. Das absolute Maximum der LUE liegt nach KERN bei 1 asb, entsprechend etwa 0.3 cd/m^2. Nach seinen Befunden fällt das Maximum der LUE zu niedrigeren L_U steil ab. Zu höheren L_U ist ebenfalls ein zwar weniger steiler aber deutlicher Abfall zu erkennen. Diese Ergebnisse konnten von uns nicht bestätigt werden. Sie sind auch nach der Kurve von KÖNIG-BRODHUN (Abb. 2a) nicht zu erwarten.

Nach den vorliegenden Messungen steigt das Maximum der LUE im untersuchten Bereich (bis L_U = 230 cd/m^2) ständig an (siehe Abb. 11). Dies entspricht auch den Untersuchungsergebnissen anderer Autoren (z.B. FALTIN, 1962; HEINEMANN, 1961; MÜLLER, 1969; REHDER, 1965).

Zur Erklärung der Diskrepanzen zwischen den Ergebnissen von KERN und den unsrigen möchten wir folgende Argumente anführen:

1.) Die Versuchspersonen mußten in der Anordnung von KERN auf die Testfeldebene, die durch eine unmittelbar hinter der zentralen Öffnung der Adaptationskugel stehenden Mattscheibe erzeugt wurde, akkommodieren, während sie bei der hier verwendeten Versuchsanordnung durch entsprechende Korrektur das Testfeld in der Ebene der Adaptometerhalbkugel ohne Akkommodation beobachten konnten.

2.) Der Einfluß von Streulicht. Da bei KERN die oben erwähnte Mattscheibe, auf die von hinten die Testfeldhälften projiziert werden, sich unmittelbar hinter dem Adaptationsschirm befand, ist zu vermuten, daß während des Versuchs - bei Öffnung des Verschlusses zwischen Schirm und Mattscheibe - von den Lichtquellen für die Umfeldbeleuchtung (L_U) auch von vorne Licht auf die Mattscheibe fiel. Dieser Effekt hatte vermutlich zur Folge, daß die Werte für die LUE von KERN insbesondere für größere Umfeldleuchtdichten zu niedrig ausgefallen sind und somit den von ihm gefundenen Abfall des Maximums der LUE mit steigender L_U erklären können.

Mit einer anderen Versuchsanordnung hat HEINEMANN (1955,1961) interessanterweise ähnliche Ergebnisse erhalten wie wir. Er benutzte ein rundes Testfeld ("test-field") von 30' Durchmesser, umgeben vom Umfeld ("inducing field"). Dem Testfeld konnte ein Lichtfleck von 10' ("increment field") überlagert werden. Es wurde die Leuchtdichte gesucht, bei der der Lichtfleck gerade wahrnehmbar war.

Aus Fig. 2 (HEINEMANN, 1961) lassen sich ähnliche Gesetzmäßigkeiten ablesen wie aus unseren Kurven:

1.) Das Maximum der LUE steigt mit der Umfeldleuchtdichte.

2.) Das Maximum der LUE liegt für niedrige Adaptationsleuchtdichten etwas oberhalb, für hohe L_U etwas unterhalb der L_U.

Obwohl die beiden Testfelder nicht wie bei uns nebeneinander lagen, sondern ineinandergeschachtelt waren, sind diese Ergebnisse vergleichbar mit den unsrigen und stehen damit auch im Gegensatz zu KERN's Befund. Der Zusammenhang der Kurven und ihrer Gesetzmäßigkeiten ist jedoch bei HEINEMANN (1961, 1972) noch nicht diskutiert. Eine formale Analyse ist bisher noch nicht gegeben.

b.) Die "statische Kennlinie" und die "dynamischen Kennlinien" nach den Modellvorstellungen von RANKE

Es ist früher bereits öfters versucht worden, den gesamten Bereich der Unterschiedsempfindlichkeit als Zahl der unterscheidbaren "Stufen" anzugeben. Schon die Ergebnisse von KÖNIG-BRODHUN (1889) wurden so gewonnen, daß zu der Umfeldleuchtdichte L_U die Schwelle ΔL gesucht wurde, um dann anschließend die Umfeldleuchtdichte auf $(L_U + \Delta L)$ zu erhöhen und erneut die Schwelle zu suchen. Bei dieser "mitlaufenden Adaptation" - Umfeld und Prüffeld identisch- erhält man für den in Abb. 2b gegebenen Leuchtdichtebereich nach RANKE (1953) etwa 485 Stufen. A. KÖNIG (1889) selbst hatte sogar 660 Stufen errechnet (582 erhalten + 78 errechnet), was mit unseren Berechnungen (Abb. 2b) nach Daten der Originalabbildung von KÖNIG und BRODHUN (Abb. 2a) übereinstimmt.

Nach den Messungen und Vorstellungen von RANKE (1953, 1961) und KERN (1953) sind jedoch diese Zahlen für das praktische Sehen irreal, weil das Auge bei Adaptation auf eine bestimmte Umfeldleuchtdichte L_U oberhalb und unterhalb von L_U nur in einem begrenzten Bereich von L eine kleinere Zahl von LUE-Stufen gleichzeitig erkennen kann. Dieser begrenzte Bereich wird durch die sogenannte "dynamische Kennlinie" gekennzeichnet, die von RANKE (1961) schematisch dargestellt wurde und seiner

Originalabbildung entsprechend in Abb. 34 mit eingezeichnet wurde.

Die statische Kennlinie stellt nach RANKE (1961, p. 214) "die Gleichgewichte zwischen Zersetzungsgeschwindigkeit und Bildungsgeschwindigkeit der photosensiblen Substanz dar." RANKE faßte die dynamischen Kennlinien der jeweiligen Bereichseinstellung des Auges als Funktion der Aktionsstromfrequenz der Optikuspotentiale auf. Unter der Annahme, daß zentral noch ein Unterschied von etwa 10 % der Aktionsstromfrequenz ausgewertet werden kann, kommt RANKE bei einem Frequenzverhältnis 1:50 zu nur 41 Stufen der LUE für die dynamischen Kennlinien $\{(1 + 0.1)^{41} = 50\}$. " Diese 41 Stufen werden durch die Adaptation jeweils gerade in den Bereich verlegt, der augenblicklich mit einer dynamischen Kennlinie durchlaufen werden kann". (RANKE, 1961, p. 215)

KERN gibt nach seinen Messungen das absolute Maximum der LUE bei 1 asb an. Dementsprechend findet RANKE auch bei dieser Adaptationsleuchtdichte die höchste Zahl der gerade unterscheidbaren Stufen der Leuchtdichte, nämlich 22 (mitgeteilt in RANKE, 1953). Zu tieferen und höheren L_U als 1 asb fällt die Zahl der Stufen nach seinen Befunden wieder ab. Nach den vorangehenden Ausführungen über das Maximum der LUE in Abhängigkeit von L_U - bei KERN - ist dies auch nicht anders zu erwarten.

c.) Die Darstellung der "Kennlinien" nach den vorliegenden Ergebnissen

Wir können mit Kenntnis der Formel (6) für den von uns untersuchten Bereich die Zahl der eben unterscheidbaren Stufen der Helligkeit bei konstanter Umfeldleuchtdichte L_U durch Aneinanderfügen der Schwellen ermitteln. Jeder Schwellenunterschied (ΔL) erhöht dabei die Zahl der Stufen um 1. Wenn zu der n'ten Stufe die Leuchtdichte L_n gehört, so gilt für die (n + 1)te Stufe:

$$L_{n+1} = L_n + \Delta L\ (L_n). \qquad (17)$$

Mit L = O beginnend, läßt sich so die "Stufenfunktion" sukzessiv berechnen. In Abb. 34 sind diese Stufenfunktionen für die Adaptationsleuchtdichten 0.1; 1; 10 und 100 cd/m^2 dargestellt. Diese Kurven entsprechen sinngemäß den dynamischen Kennlinien der Bereichseinstellung nach RANKE (1953, 1961).

Zur Interpretation der Punkteschar in Abb. 34 ist noch zu erläutern: je dichter die Punkte aufeinanderfolgen, umso besser ist die LUE. Der Punktabstand kennzeichnet nach FECHNER (1860) jeweils eine Einheit der Helligkeitsempfindung (unit of sensation). Der erste Punkt bedeutet jeweils ΔL_s. Der Leuchtdichtebereich unterhalb dieses Anfangsteils der Kurve erscheint subjektiv schwarz. Das folgende, nahezu lineare Teilstück entspricht dem Gültigkeitsbereich der Weber'schen Regel ($\frac{\Delta L}{L}$ = konst.). Die Stelle der größten Steilheit liegt in der Mitte dieses Bereiches, bei $L = L_{Max}$. Bei dieser Leuchtdichte liegt jeweils das Maximum der LUE. Der obere, ebenfalls flach auslaufende Teil - Sättigungsbereich der Kurve - wird als subjektiv weiß empfunden. Da die Kurven in dem untersuchten Bereich noch nicht asymptotisch auslaufen, gibt es hier zu jeder noch so hohen Leuchtdichte eine höhere, die subjektiv heller erscheint, wobei allerdings das Verhältnis $\frac{\Delta L}{L}$ immer größer wird.

Die statische Kennlinie ergibt sich aus der Verbindungslinie der Schnittpunkte der dynamischen Kennlinien mit den jeweils zugehörigen Adaptationsleuchtdichten. Auch aus Abb. 34 geht hervor, daß bei Adaptation an niedrige Leuchtdichten (L_U) das Maximum der LUE - geringster Abstand der Punkte - deutlich oberhalb der jeweiligen L_U liegt. Mit der Adaptation an höhere Leuchtdichten nähert sich das Maximum der LUE der L_U. Der weitere Anstieg der statischen Kennlinie im Verhältnis zu den dynamischen Kennlinien bei Adaptation an höhere L_U hat zur Folge, daß in diesem Bereich das Maximum der LUE unterhalb von der jeweiligen L_U liegt (siehe auch Formel (16)).

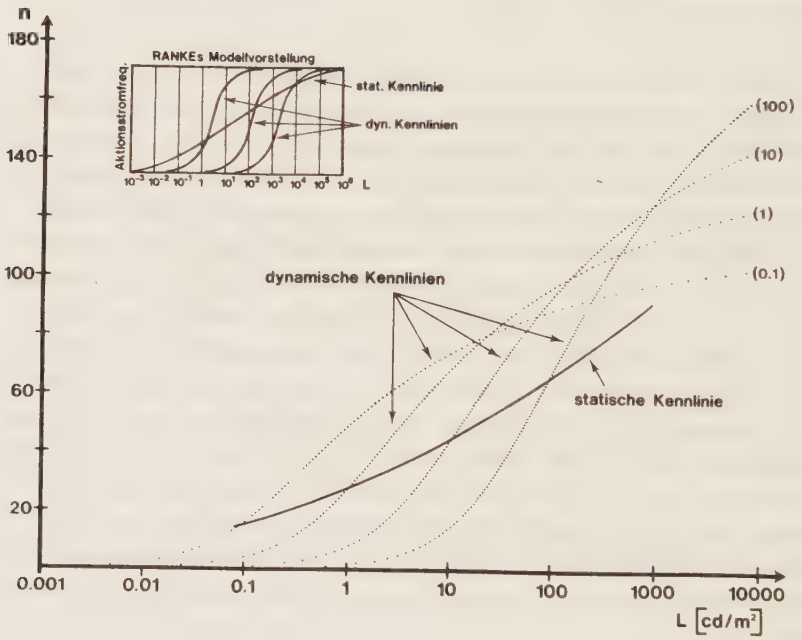


Abb. 34. Die Zahl der unterscheidbaren Helligkeitsstufen als Funktion der Leuchtdichte L für die Adaptationsleuchtdichten L_U = 0.1, 1, 10 und 100 cd/m², den dynamischen Kennlinien von RANKE entsprechend. Die "statische Kennlinie" ist als ausgezogene Linie dargestellt. Zum Vergleich ist die Originalabbildung von RANKE links oben in der Abbildung miteingezeichnet.

Subjektiv bedeutet dieser Sachverhalt, daß wir bei Adaptation an niedrige Leuchtdichten (L_U) ein besseres Unterscheidungsvermögen für Helligkeiten oberhalb dieser L_U haben, während bei Anpassung an höhere L_U das genauere Unterscheidungsvermögen in dem Leuchtdichtebereich unterhalb von L_U liegt. Dies entspricht durchaus der allgemeinen Erfahrung und wurde auch bereits von RANKE (1961, p. 215) aus seiner Modellvorstellung (s. Abb. 3 und 34 abgeleitet).

Im Gegensatz zu den Ergebnissen von KERN (zit. bei RANKE, 1953) steigt die Zahl der Stufen mit L_U bei unseren Untersuchungen zu wesentlich höheren Werten an, und die dynamischen Kennlinien erreichen einen Sättigungsbereich, der mit L_U ansteigt. Bei KERN verlaufen die dynamischen Kennlinien für verschiedene L_U praktisch parallel und der Sättigungsbereich ist nicht zu erkennen. Auch aus den Befunden von HEINEMANN (1961, 1972) lassen sich Kennlinien ableiten, die mehr den unsrigen ähneln als denen von KERN. Die ursprüngliche Vorstellung von RANKE, daß die Zahl der Stufen einer dynamischen Kennlinie konstant (= 41) und unabhängig von der Lage des Adaptationsbereiches sei, ist nach den hier vorliegenden Ergebnissen nicht richtig.

Die höhere Zahl der von uns gefundenen Stufen möchten wir begründen: 1. durch das größere Testfeld von 1° gegenüber 34' bei KERN und 2. durch die zu niedrig ausgefallenen LUE-Werte bei KERN, insbesondere bei höheren Adaptationsleuchtdichten, infolge der Einwirkung von Streulicht - wie bereits diskutiert.

Es ist noch bemerkenswert (Abb. 34), daß mit steigender Adaptationsleuchtdichte (L_U) nicht nur die Zahl der unterscheidbaren Stufen wächst,sondern auch die Steilheit der dynamischen Kennlinien deutlich zunimmt. Außerdem wächst der etwa lineare Bereich mit der Adaptationsleuchtdichte L_U an. Das hat zur Folge, daß wir mit wachsendem L_U nicht nur eine bessere Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit haben, sondern es wird auch der Bereich der etwa konstanten LUE größer (der Weberschen Regel entsprechend).

Diese subjektiv ermittelten Kennlinien finden wir in den objektiven Messungen der Neurophysiologie wieder (z.B. SAKMANN und CREUTZFELDT, 1969; WERBLIN, 1971; CREUTZFELDT, 1972). SAKMANN und CREUTZFELDT fanden als Antwort auf Reizung mit einem Testfleck von 20 Bogenminuten an einer retinalen on-center Ganglien-Zelle und verschiedenen Adaptationsleuchtdichten "Kennlinien" der Spike-Frequenz, die unseren, aus subjektiven Messungen abgeleiteten dynamischen Kennlinien, ähnlich sind. Die Ganglien-Zelle unterscheidet auch nur in einem schmalen Bereich oberhalb und unterhalb der jeweiligen Adaptationsleuchtdichte. Insbesondere steigt aber das Signal-Rausch-Verhältnis mit wachsender Adaptationsleuchtdichte analog der Zunahme des Maximums der LUE an.

d.) Die Berechnung der "dynamischen Kennlinien"

Die Kurven nach Abb. 34 lassen sich selbstverständlich auch durch Integration ermitteln. Der eben merkliche Unterschied der Leuchtdichte (ΔL) wird als Einheit des Empfindungszuwachses angesehen und = 1 gesetzt. Der "relative Empfindungszuwachs" in differentieller Form ($\frac{dE}{1}$) entspricht dem relativen differentiellen Reizzuwachs ($\frac{dL}{\Delta L}$), also

$$\frac{dE}{1} = dE \longleftrightarrow \frac{dL}{\Delta L} \qquad (18a)$$

($\longleftrightarrow$: Abbildungszeichen nach HENSEL, 1966, 1975)
Durch Integration ergibt sich unter Berücksichtigung von $\Delta L = \Delta L_s + bL^c$

$$\int_0^n dE = n \longleftrightarrow \int_0^{L_n} \frac{dL}{\Delta L_s + bL^c} \quad , \qquad (18b)$$

wobei n die Zahl der bis zur Leuchtdichte L_n durchlaufenen Unterschiedsschwellen ΔL ("Stufen") angibt. Die Konstanten in Gleichung (18b) ergeben sich aus Gleichung (6). Wegen $c = 1.25$ ist das Integral nicht geschlossen darstellbar, läßt sich aber leicht mit Hilfe eines Rechners auswerten. Die auf

diese Weise ermittelten Kurven sind mit denen in Abb. 34 identisch. Trotzdem sind in Abb. 34 die dynamischen Kennlinien als Punkteschar abgebildet, weil in der Darstellung der mathematischen Funktion der in der Dichte der Punkte liegende Informationsgehalt verloren gehen würde.

Wie man leicht zeigen kann, ist das Integral (18b) beschränkt. Gerade weil c größer ist als 1, konvergiert das Intergral! Die Anzahl der Unterschiedsstufen ist also auch beschränkt. Hier liegt ein besonderer Unterschied unserer Ergebnisse zu dem "Weber-Fechnerschen Gesetz". Das Integral $\int \frac{dL}{L} =$ log L konvergiert nicht. Die Anzahl der Unterschiedsstufen ist nach FECHNER unbegrenzt.

Schon HELMHOLTZ (1866) stört sich daran, daß nach FECHNER die "Empfindungsstärke" für große Reize nicht konvergiert. Er schlug deshalb vor, die Weber-Fechnersche Konstante auch als eine Funktion der Reizstärke darzustellen und kam so zu der differentiellen Form

$$dE \longleftrightarrow \frac{a\,dH}{(b+H) \cdot (H_o+H)}$$

(H: Helligkeit; a,b,H_o: Konstanten).

Die Integration führt zu

$$E \longleftrightarrow \frac{a}{b - H_o} \ln \frac{H_o + H}{b + H} .$$

Diese Funktion <u>konvergiert</u>. Die quadratische Potenz in der Helligkeit ist aber nach unseren Ergebnissen zu groß. Wir finden für den photopischen Bereich einen angenäherten konstanten Potenzfaktor von c = 1.25. Außerdem kann die von HELMHOLTZ angegebene Funktion die experimentellen Ergebnisse schon deshalb nicht beschreiben, weil sie für H > O keinen Wendepunkt besitzt.

In Abb. 34 ist für die Umfeldleuchtdichte L_U = 0.1 cd/m² das Maximum der Unterschiedsstufen bei L = 10 000 cd/m² schon fast erreicht.

Der Integrand in (18b) bedeutet die Steilheit (S) der dynamischen Kennlinien. Für den Wert der größten Steilheit (S_{Max}) ergibt sich unter Berücksichtigung von $L_{Max} = 2.26\ L_U^{0.80}$ (Formel 16)

$$S_{Max} = \frac{1}{0.125 \cdot L_U^{0.7}} \cdot \qquad (19)$$

Dies bedeutet, daß an der Stelle der größten Steilheit die Unterschiedsschwelle $\Delta L = 0.125 \cdot L_U^{0.7}$ ist, entsprechend 1 Stufe für die Empfindung von Helligkeitsunterschieden.

Nach (19) fällt S_{Max} mit wachsendem L_U. In Abb. 34 nimmt die Steilheit der Kennlinien mit L_U zu. Dies ist durch den logarithmischen Maßstab bedingt. Die LUE ist auch nicht durch den absoluten Wert ΔL, sondern durch das Verhältnis $\frac{L}{\Delta L}$ bestimmt. Berechnet man dieses Verhältnis an der Stelle $L = L_{Max}$ (siehe Formel 16 und 19), so folgt für das Maximum der LUE (= LUE_{Max})

$$LUE_{Max} = 18 \cdot L_U^{0.1} \qquad (20)$$

Formel (20) beschreibt auch gleichzeitig den Anstieg von LUE_{Max} wie er in Abb. 11 zum Ausdruck kommt.

Aus Formel (15) läßt sich auch das Verhältnis $\frac{L}{\Delta L}$ für $L = L_U$ berechnen. Diese Größe kennzeichnet die Unterschiedsempfindlichkeit eines Testfeldes gegen das Umfeld, was in der Regel als Versuchsanordnung für die Bestimmung der LUE benutzt wird. Aus (15) ergibt sich für dieses Verhältnis ein flacher Anstieg mit der Umfeldleuchtdichte im Bereich für L_U von 0.1 bis 100 cd/m². Für L_U kleiner als 0.1 cd/m² finden wir einen steileren Abfall. Die LUE liegt in der Größenordnung von etwa 10 bei L_U = 0.1 bis 25 bei L_U = 100 cd/m².

Diese Ergebnisse entsprechen denen von BLACKWELL (1963), AULHORN, HARMS und RAABE (1966) sowie AULHORN und HARMS (1974), die unter statischen Bedingungen die LUE bei der jeweiligen Adaptationsleuchtdichte L_U gemessen haben.

Tatsächlich erfaßt man nicht das Maximum der LUE, wenn man nur das Verhältnis $L/\Delta L$ für $L = L_U$ bestimmt. Für den Bereich L_U niedriger als 10 cd/m² und L_U höher als 100 cd/m² wird nach unseren Befunden die so gewonnene LUE kleiner ausfallen, als es bei der jeweiligen Adaptationslage in diesem Bereich der maximalen Leistungsfähigkeit des Auges entspricht.

5.1.2 Skotopischer Bereich

Verglichen mit dem photopischen Bereich ist unter den Bedingungen geringer Adaptationsleuchtdichten (skotopischer Bereich) die LUE sehr klein. Aus den Abb. 15 und 16 wird deutlich, daß die Fovea praktisch nachtblind ist. In Abb. 16 zeigen sich nahezu identische Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeiten im skotopischen Bereich wie im angrenzenden mesopisch-photopischen Bereich. Die LUE ist nur wenig größer als Null für L im Bereich der skotopischen Adaptationsleuchtdichten ($L < 0.1$ cd/m²). Entsprechend gibt es für die Fovea auch nur eine einzige zuständige "dynamische Kennlinie". Da die Fovea bekanntlich nur Zapfen enthält und das Testfeld von 1° Durchmesser innerhalb der Fovea centralis abgebildet wird, ist nach der Duplizitätstheorie von v. KRIES kein anderes Verhalten zu erwarten. Für die Fovea hat man praktisch den gesamten skotopischen Bereich mit der dynamischen Kennlinie für $L_U = 0.1$ cd/m² erfaßt.

Das Besondere an den Ergebnissen im skotopischen Bereich liegt in dem Verlauf der Einzelmessungen für die Unterschiedsschwelle ΔL (Abb. 12, 13). Diese Abweichungen von der vorher beschriebenen glatten Kurve sind zwar im allgemeinen so gering, daß sie den Verlauf der LUE-Kurven bzw. den Verlauf der dynamischen Kennlinien nur unwesentlich beeinflussen, andererseits sind sie deutlich genug, um nach einer Erklärung zu verlangen.

Nach Abb. 12 und 13 läuft ΔL nicht wie im photopischen Bereich zu niedrigeren L hin sofort in eine Konstante aus. Zunächst sinkt ΔL weiter ab, um dann im Bereich $L \approx L_U$ wieder anzusteigen. Erst zu noch niedrigeren Werten L hin finden wir das Auslaufen der Kurve in eine Konstante, die wir wieder ΔL_s genannt haben. Die zunächst verbesserte Unterschiedsschwelle läßt sich als Kontrastphänomen erklären.

Wenn die Testfeldleuchtdichten nur geringfügig heller sind als das Umfeld, so erscheinen sie wegen der dann einsetzenden Kontrastüberhöhung noch heller als sie eigentlich sind. Damit wird auch der Leuchtdichteunterschied ΔL der beiden Testfeldhälften subjektiv verstärkt, so daß in diesem Bereich eine geringfügig verbesserte Schwelle vorliegt.

Wenn hingegen das Testfeld dunkler ist als das Umfeld, so führt die Kontrastüberhöhung dazu, daß das Testfeld im Vergleich zum Umfeld zu dunkel gesehen wird. Damit wird aber subjektiv die Leuchtdichtedifferenz ΔL der beiden Testfeldhälften verringert, was eine schlechtere Schwelle ergibt.

Offensichtlich ist die Hemmung bzw. Verstärkung im Bereich L ungefähr gleich L_U am stärksten, da wir für $L \gg L_U$ und $L \ll L_U$ keine derartigen Unregelmäßigkeiten entdecken konnten.

Ähnliche Beeinflussung der LUE durch die Umgebungsleuchtdichte hat auch WESTHEIMER (1965, 1967) sowie WYATT (1972) beschrieben.

Die Abweichungen der Kurvenform lassen sich mathematisch aus (1) sehr gut annähern, wenn dem Parameter ΔL_s eine Gauß-Funktion für die Verstärkung und eine Gauß-Funktion für die Hemmung überlagert wird.

Die Kurven in Abb. 12 und 13 sind entsprechend gezeichnet worden. Wenn wir

$$\Delta L = \Delta L_s^* + b \cdot L^c \qquad (21)$$

setzen, mit

$$\Delta L_s^* = \Delta L_s \left\{ 1 + A_1 e^{-\frac{(\log L - \log B_1)^2}{\sigma_1^2}} - A_2 e^{-\frac{(\log L - \log B_2)^2}{\sigma_2^2}} \right\}, \qquad (22)$$

so können die Meßwerte im skotopischen Bereich mit hinreichender Genauigkeit mit geeigneten Parametern A_1, B_1, σ_1, A_2, B_2, σ_2 angenähert werden. Es ist allerdings nicht zu erwarten, daß die Parameter A_1 bis σ_2 Konstanten sind bzw. eine eindeutige Abhängigkeit von L_U besteht. Vielmehr ist es so, daß das Ausmaß der Hemmung und der Verstärkung schon bei derselben Versuchsperson keine konstante Größe ist. Während sich bei Wiederholung der Versuche mit derselben Vp die Parameter ΔL_s, b und c mit großer Genauigkeit wiederfinden, ergeben sich bei den Parametern für die Hemmung und Verstärkung größere Streuungen. Diese mehr spekulative formale Analyse ist vielleicht deswegen gerechtfertigt, weil bekanntlich die diesem Verhalten zugrunde liegenden Phänomene der lateralen Hemmung sich relativ gut durch Überlagerung von Gauß-Funktionen beschreiben lassen.

Aus den Versuchsergebnissen lassen sich einige Grundregeln ableiten:

1.) Der Bereich der Hemmung (σ_1) ist immer größer als der Bereich der Verstärkung (σ_2).

2.) Das Maximum der Hemmung liegt etwa bei der Umfeldleuchtdichte L_U.

3.) Das Maximum der Verstärkung liegt oberhalb L_U. Der Bereich der Verstärkung ist dem hemmenden Anteil überlagert.

Interessanterweise finden wir diesen für das skotopische Sehen typischen Verlauf von ΔL auch bei Vp Chr. (Protanop). Abb. 35 zeigt eine Einzelmessung für Chr.

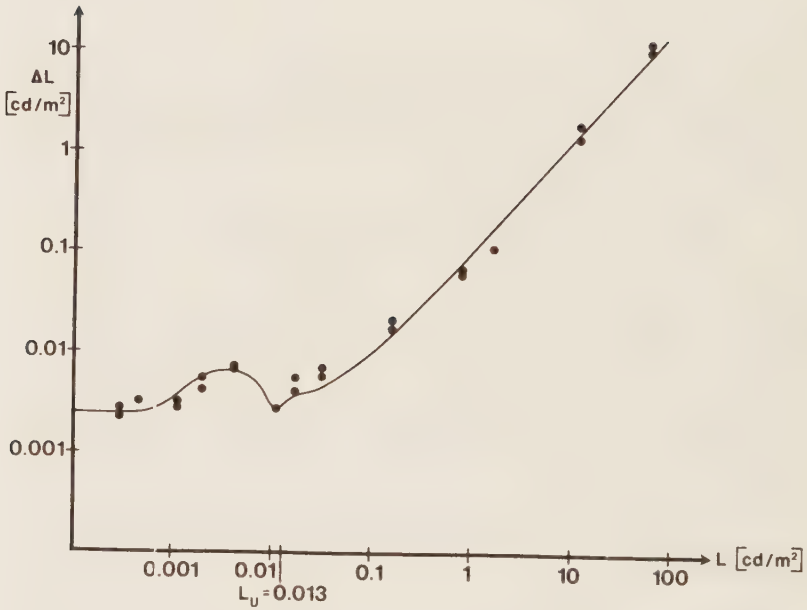


Abb. 35. ΔL in Abhängigkeit von L bei L_U = 0.013 cd/m²
Vp.: Chr.

5.2. Parafovealer Bereich

Erwartungsgemäß ist die LUE für Adaptationsleuchtdichten L_U im photopischen Bereich parafoveal geringer als foveal (Abb. 16, 20, 24). Dieser Unterschied fällt um so größer aus, je weiter der Abstand von der Fovea ist. Während wir bei 6^o parafoveal für $L_U \geq 1$ cd/m^2 noch nahezu die gleichen LUE's wie foveal finden, so sinkt die LUE bei 12^o parafoveal doch weit ab. Dafür nimmt im umgekehrten Maße bei geringen Umfeldleuchtdichten die LUE zu. Bei 12^o bis 15^o parafoveal liegt auch das Minimum der Leuchtdichteunterschiedsschwelle der Netzhaut überhaupt (WERTHEIM, 1894; AULHORN, HARMS und RAABE, 1966). Der Grund für diesen Sachverhalt ist sicher in der Verteilung der Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut zu suchen. 6^o temporal ist die Dichte der Stäbchen und Zapfen nicht sehr verschieden, während bei 12^o der Anteil der Zapfen bereits vernachlässigbar gering ist. In diesem Bereich hat dafür die Stäbchendichte schon fast ihr Maximum erreicht. Aus methodischen Gründen war es erforderlich, bei den parafovealen Versuchen den Durchmesser der Testfeldgröße zu verdoppeln. Aus diesem Grunde sind die Ergebnisse der temporalen und fovealen Messungen nur qualitativ und nicht quantitativ vergleichbar.

Daß die Schwelle ΔL im skotopischen Bereich parafoveal weitaus geringer ist als foveal, darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, daß die LUE trotzdem sehr niedrig ist. Das Maximum der LUE für $L_U = 0.01$ cd/m^2 liegt bei 2.

Der Unterschied von Fovea zum parafovealen Bereich wird auch deutlich, wenn wir wie in Abb. 34 die dynamischen Kennlinien konstruieren. In Abb. 36 und 37 sind diese Kurven für 6^o und 12^o temporal dargestellt. Für Umfeldleuchtdichten im skotopischen Bereich steigen die Kurven sehr früh an, sind aber schon nach wenigen Stufen im Sättigungsbereich. Es fehlt die Hilfe der Zapfen für die höheren Testfeldleuchtdichten. Für photopische Umfeldleuchtdichten sind die dynamischen Kennlinien für 6^o temporal ähnlich den fovealen. 12^o temporal sind auch photopisch nur noch wenige Helligkeitsstufen unterscheidbar. Die Kurven verlaufen insgesamt so flach, daß

auch im günstigsten Bereich die Unterscheidungsfähigkeit für Helligkeiten sehr gering ist.

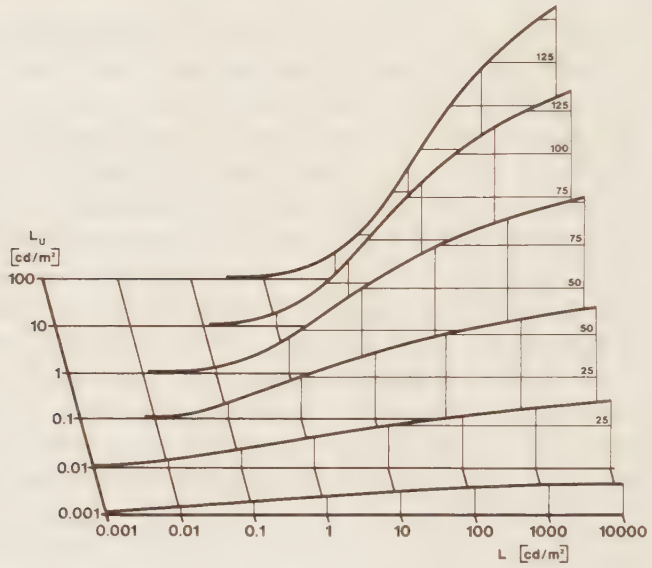
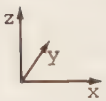


Abb.36. Räumliche Darstellung der dynamischen Kennlinien für die Umfeldleuchtdichten L_U = 0.001, 0.01, 0.1, 1, 10, 100cd/m²



x - Achse: Testfeldleuchtdichte L
y - Achse: Umfeldleuchtdichte L_U
z - Achse: Anzahl n der unterscheidbaren Helligkeitsstufen

Netzhautort: 6° temporal

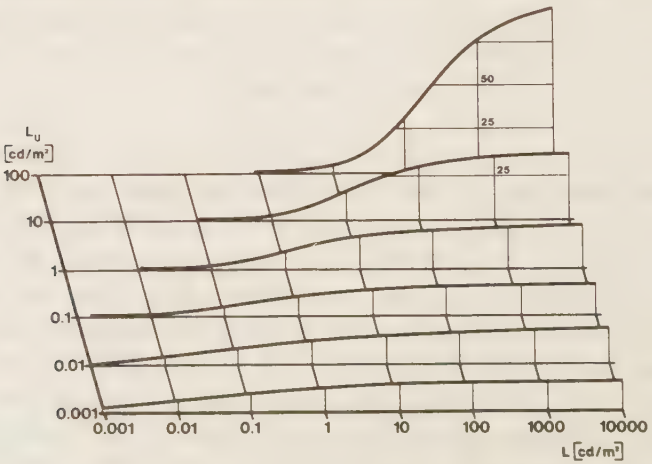


Abb.37. wie Abb. 36. Netzhautort: 12° temporal

5.3 Vergleich der Leistungen von Fovea und Peripherie

5.3.1 Verhalten der LUE

Wie wir zeigen konnten, liegt das Maximum der LUE nicht unbedingt bei der jeweiligen Adaptationsleuchtdichte. Trotzdem sind in Tabelle I die Leuchtdichteunterschiedsschwellen ΔL und die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeiten LUE für $L = L_U$ zusammengestellt, weil so die Leistungen von Fovea und Peripherie verglichen werden können. Die entsprechenden Werte sind aus den vorher angegebenen Formeln (1, 6, 8, 10, 11, 12, 13 und Abb. 15, 23b) berechnet. In Abb. 38a sind diese Daten zum Vergleich mit der KÖNIG-BRODHUN-Kurve dargestellt. Erwartungsgemäß liegen unsere Meßwerte alle unterhalb der KÖNIG-BRODHUN-Kurve. Abb. 38b unterscheidet sich von Abb. 38a nur durch die logarithmische Teilung der Ordinate (LUE-Achse). So tritt der Unterschied in der LUE zwischen Fovea und Peripherie im skotopischen Bereich besonders deutlich hervor.

In der Fovea ist ein Testfeld von 1° Durchmesser verwendet worden, an den beiden anderen Netzhautorten ein Testfeld von 2°. Trotzdem lassen sich - wie bereits erwähnt - die Ergebnisse qualitativ vergleichen, da eine Änderung der Testfeldgröße nur eine Parallelverschiebung der LUE-Kurven bewirkt (siehe auch 4.1.1a).

L_U (cd/m^2)	ΔL (cd/m^2)			LUE = $L_U/\Delta L$		
	Fovea	6°	12°	Fovea	6°	12°
0.001	0.0027	0.0011	0.00062	0.36	0.9	1.6
0.01	0.0033	0.004	0.0042	2.75	2.5	2.4
0.1	0.009	0.017	0.034	11.1	5.9	2.95
1	0.061	0.0825	0.21	16.4	12.1	4.7
10	0.45	0.47	1.17	22.4	21	8.56
100	3.5	3.3	5.4	29	30	18.3

Tabelle I: ΔL und LUE für verschiedene Adaptationsleuchtdichten und Netzhautorte

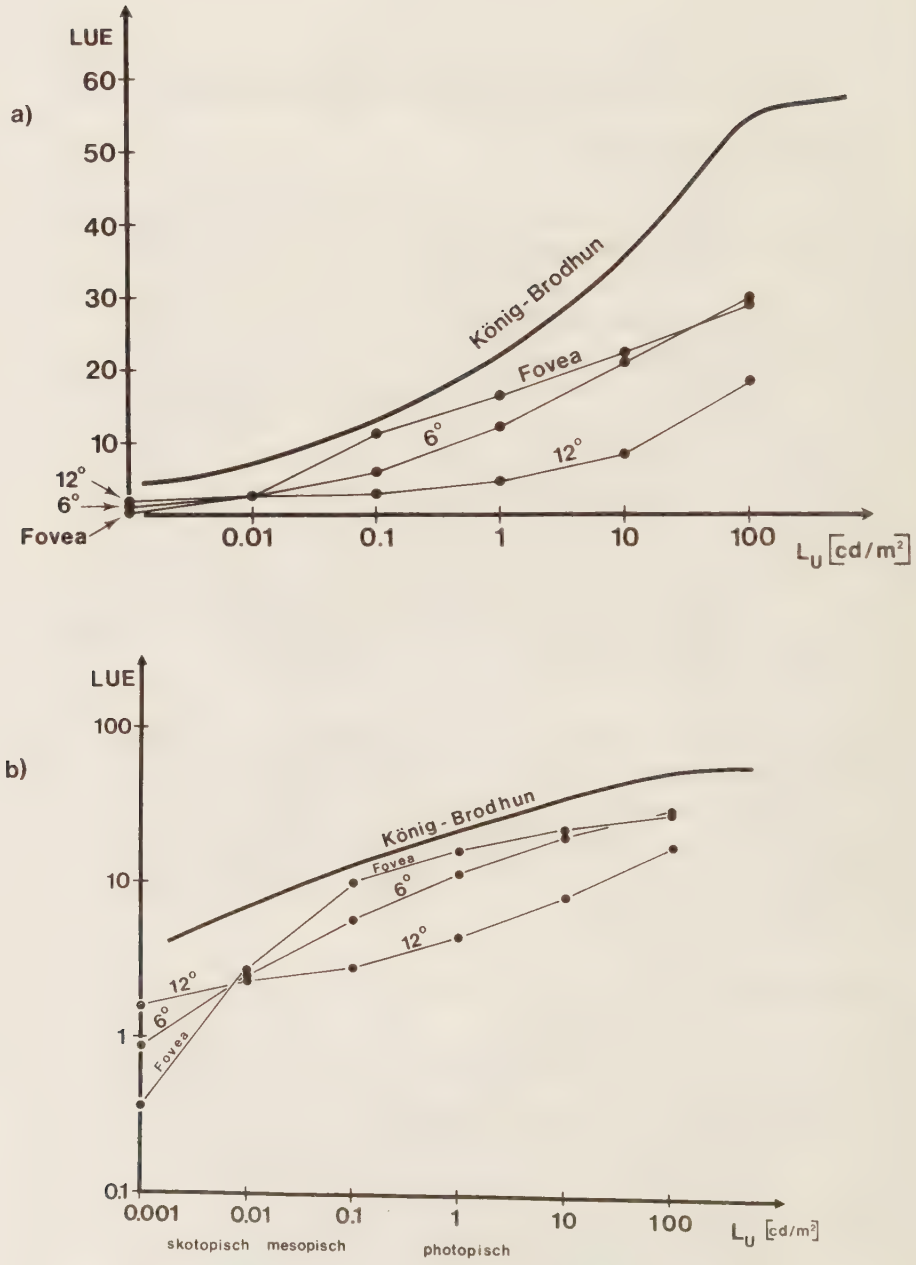


Abb. 38. Verlauf der LUE bei $L = L_U$ (Testfeldleuchtdichte = Umfeldleuchtdichte), gemessen für die Netzhautorte Fovea, 6^o und 12^o temporal nach den vorliegenden Ergebnissen. Zum Vergleich ist die KÖNIG-BRODHUN-Kurve (s. Abb. 2) mit eingezeichnet.
a) LUE linear, b) LUE logarithmisch aufgetragen

Für sehr niedrige Adaptationsleuchtdichten wie z. B. L_U = 0.001 cd/m^2 ist die LUE für L = L_U in der Peripherie größer als foveal. Aber schon für L_U = 0.01 cd/m^2 liegen etwa gleichwertige Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeiten vor, foveal sowie 6° und 12° parafoveal. Bei den höheren Adaptationsleuchtdichten fällt der Netzhautort 12° temporal immer mehr ab gegen Fovea und 6° temporal. In der weiteren Peripherie ist der Bereich, in dem Leuchtdichteunterschiede bei vorgegebenen mesopischen-photopischen Adaptationsleuchtdichten erkennbar sind, sehr stark eingeschränkt. Dafür ist im skotopischen Sehen die LUE verbessert. Die Kurven überschneiden sich beim Übergang vom mesopischen zum skotopischen Sehen - etwa bei L_U = 0.01 cd/m^2.

Eine dreidimensionale Gesamtdarstellung der LUE-Kurven für die Netzhautorte Fovea, 6° und 12° temporal ist in Abb. 39 gegeben.

Der Verlauf der Maxima der LUE-Kurven knickt in der Fovea bei $L_U \approx$ 0.1 cd/m^2 ab. Unterhalb von etwa 0.1 cd/m^2, im skotopischen Bereich, sind die Kurven praktisch identisch. Die Fovea ist "nachtblind". Bei Adaptation an eine skotopische Leuchtdichte liegt das Maximum der LUE weit oberhalb der Umfeldleuchtdichte L_U bei einer durch die Zapfen bestimmten photopischen Leuchtdichte.

Anders in der Peripherie: Die Lage der Maxima fällt recht gut mit der jeweiligen Adaptationsleuchtdichte zusammen, auch noch im skotopischen Bereich. Der von den Stäbchen erwartete Gewinn im parafovealen Bereich fällt allerdings sehr gering aus. Bei Adaptation an 0.01 cd/m^2 sind die LUE's für alle 3 Netzhautorte etwa = 2.5. Erst bei L_U = 0.001 cd/m^2 zeigt sich die Peripherie gegenüber der Fovea deutlich überlegen. Trotzdem beträgt auch dort die LUE nur 1.6 gegenüber 0.36 in der Fovea. Bei hohen Leuchtdichten hingegen fällt das Kontrastunterscheidungsvermögen der Peripherie stark ab gegenüber der Fovea. Der Netzhautort 6° temporal verhält

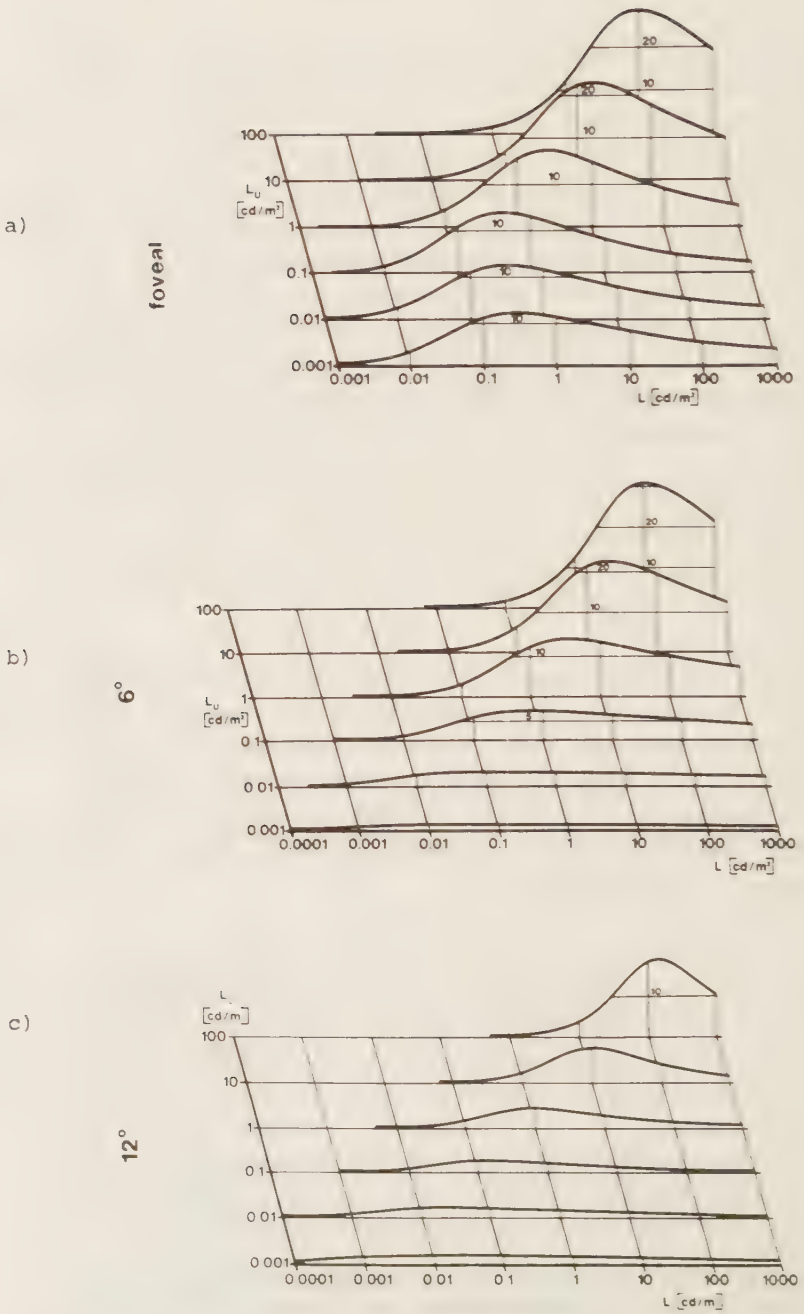


Abb. 39. Zusammenstellung der LUE-Kurven für die versch. Netzhautorte a) Fovea, b) 6° und c) 12° temporal

sich bei dieser Versuchsanordnung - vermutlich aufgrund des größeren Testfeldes so, daß er die Vorteile der Fovea im photopischen Bereich miterfaßt, im Dunkeln aber schon einen Gewinn gegenüber der Fovea zu verzeichnen hat.

5.3.2 Der Gesamtwahrnehmungsbereich und die dynamischen Kennlinien für Fovea und parafoveale Netzhautorte (6^{o} und 12^{o} temporal)

Da das Integral nach Gleichung (17b) konvergiert, läßt sich die Zahl n_{∞} der (theoretisch) maximal wahrnehmbaren Leuchtdichteunterschiede berechnen. Diese Zahl ist ein gutes Maß für den Gesamtumfang der Wahrnehmung auf dem jeweiligen Adaptationsniveau. Es läßt sich auch berechnen, wieviele dieser Unterschiedsschritte bereits bis zur Adaptationsleuchtdichte L_U durchlaufen sind. Diese Zahl n_{L_U} entspricht dem Wert der statischen Kennlinie bei der Umfeldleuchtdichte L_U. Die folgende Tabelle (Tab. II) gibt n_{L_U} und n_{∞} sowie das Verhältnis n_{L_U}/n_{∞} für die untersuchten Netzhautorte wieder.

In Abb. 40 ist die Anzahl der bis zur Umfeldleuchtdichte L_U durchlaufenen Unterschiedsschwellen in % von den bei dem Adaptationsniveau L_U insgesamt wahrnehmbaren Helligkeitsstufen dargestellt ($n_{L_U}/n_{\infty} \cdot 100$).

Die Auswertung des Integrals (17b) mußte mit einem Rechner durchgeführt werden, da es sich nicht geschlossen darstellen läßt.

Für alle Netzhautorte steigt n_{L_U} mit der Umfeldleuchtdichte an. Hier fällt vor allem der Unterschied zwischen Fovea und Peripherie im skotopischen Bereich auf. Für $L_U = 0.001$ sowie für $L_U = 0.01$ cd/m^2 ist n in der Fovea kleiner als der jeweils entsprechende Wert für 6^{o} und 12^{o}. Für den folgenden mesopischen-photopischen Bereich ergeben sich für Fovea und 6^{o} temporal etwa die gleichen Werte sowohl für n_{L_U} als auch für n_{∞}, während für 12^{o} temporal n_{L_U} sowie n_{∞} weniger stark ansteigt.

Tabelle II: Dynamikumfang der untersuchten Netzhautorte bei unterschiedlichen Adaptationsleuchtdichten L_U

L_U (cd/m^2)	Fovea			6^o temp			12^o temp		
	n_{L_U}	n_∞	n_{L_U}/n_∞	n_{L_U}	n_∞	n_{L_U}/n_∞	n_{L_U}	n_∞	n_{L_U}/n_∞
0.001	0.4	117	0.003	1.8	28	0.065	3	27	0.11
0.01	2.9	105	0.028	4	61	0.067	5	23	0.21
0.1	15.5	102	0.15	9.6	92	0.10	6.3	20	0.31
1	26	127	0.21	20	135	0.15	10	27	0.37
10	43	159	0.27	39	178	0.22	16	42	0.38
100	67	200	0.33	68	212	0.32	29	84	0.34

Wie schon erwähnt ist der Anfangsteil und damit n_{L_U} der Kennlinien im wesentlichen bestimmt durch den Parameter ΔL_s, während das asymptotische Auslaufen sehr stark vom Parameter c abhängig ist.

Besonders deutlich wird dieser Sachverhalt für die Fovea bei niedrigen Umfeldleuchtdichten L_U. Die Maximalzahl n_∞ für $L_U = 0.001$ cd/m^2 ist größer als n_∞ für $L_U = 0.1$ cd/m^2. Zu diesen niedrigen Umfeldleuchtdichten gehört ein kleinerer Wert c als für höhere. Bei der Berechnung von n_∞ müssen die Ergebnisse jenseits des untersuchten Bereiches extrapoliert werden. Es ist anzunehmen, daß dort der Parameter c für ein festes Umfeld L_U nicht konstant bleibt, sondern ebenfalls größer wird. Damit würde auch die Zahl n_∞ kleiner werden, vermutlich würde man für $L_U = 0.001$ bis $L_U = 0.1$ cd/m^2 etwa gleiche Zahlen n_∞ erhalten.

Dasselbe gilt für den zunächst leichten Abfall von n_∞ mit steigendem L_U für den 12° temporalen Netzhautort. Die folgende, nur schwache Zunahme von n_∞ ist auf das im Vergleich zu Fovea und 6° temporal starke Ansteigen des Parameters c mit L_U zurückzuführen.

Die im Vergleich zur Peripherie hohen Werte für n_∞ in der Fovea bei Adaptation an skotopische Leuchtdichten sind eine Folge der sehr viel größeren Empfindlichkeit der Zapfen für Leuchtdichten, die oberhalb der skotopischen Adaptationsleuchtdichten im photopischen Bereich liegen.

Nach Abb. 39 sind im gesamten untersuchten skotopischen Bereich die LUE-Kurven nahezu identisch. Deshalb ist das Verhältnis n_{L_U}/n_∞ in diesem Bereich in der Fovea besonders niedrig. Hier zeigt sich ein deutlicher Vorteil der Peripherie, denn dort hat dieses Verhältnis einen größeren Wert (s. Abb. 40).

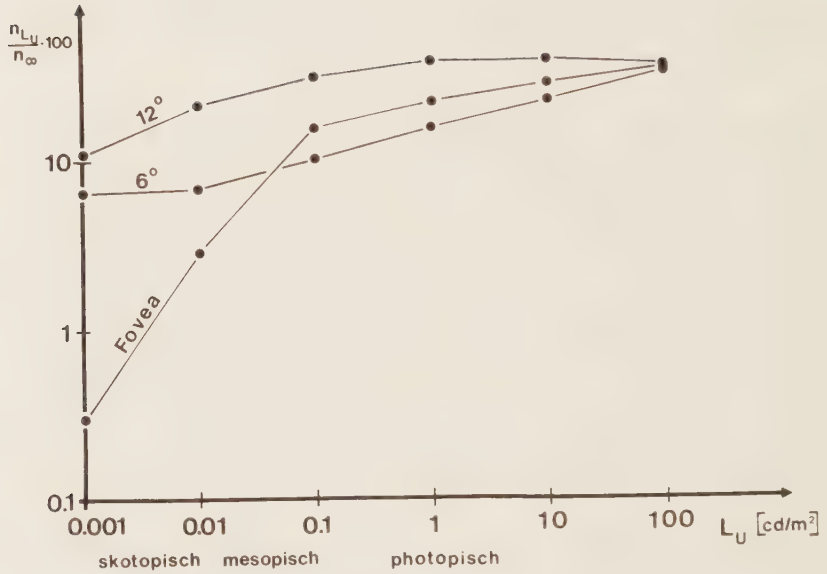


Abb. 40. n_{L_U} in % von n_∞ in Abhängigkeit von L_U

Man hätte erwarten können, daß für höhere L_U bis zum Wert L_U mehr als die Hälfte der insgesamt wahrnehmbaren Helligkeitsstufen (n_∞) durchlaufen worden sind. Tatsächlich ist das Verhältnis n_{L_U}/n_∞ in dem untersuchten Bereich durchweg kleiner als 0.5. Der größere Teil der Unterschiedsstufen liegt also immer oberhalb der Adaptationsleuchtdichte. Hierin liegt die besondere Eigenart der dynamischen Kennlinien nach unseren Befunden. Sie sind auch nicht symmetrisch zu ihrem Wendepunkt, wie es z. B. RANKE primär angenommen hat (s.a. Abb. 3).

Es ist auch theoretisch keine Symmetrie zu erwarten, da die Unterschiedsempfindlichkeit ΔL zu niedrigen L hin durch ΔL_s begrenzt ist, während sie sich zu höheren L hin über

einen weiten Bereich proportional zu L (im log-log-Maßstab) verhält.

Allerdings geht aus Tabelle II und Abb. 40 hervor, daß die bis zur Adaptationsleuchtdichte durchlaufenen Unterschiedsschwellen im Verhältnis zu der jeweiligen Gesamtzahl der Unterschiedsschwellen in der Fovea und in der Peripherie sich grundsätzlich anders verhalten. Für die Fovea ist das schon mehrfach beschriebene Verhalten bei skotopischen Leuchtdichten typisch: nahezu die gesamte dynamische Kennlinie liegt oberhalb der jeweiligen zugehörigen Adaptationsleuchtdichte, n_{L_U}/n_∞ ist entsprechend niedrig. Im photopischen Bereich steigt n_{L_U}/n_∞ gleichmäßig mit L_U an. Ähnlich verhält sich der Netzhautort 6° temporal. Allerdings finden wir hier praktisch in dem gesamten untersuchten Bereich dieses gleichmäßige Ansteigen von n_{L_U}/n_∞ mit L_U. Für skotopische Umfeldleuchtdichten ist dieses Verhältnis größer als bei den entsprechenden Adaptationsleuchtdichten für die Fovea.

Ganz anders sind die Ergebnisse für die weitere Peripherie. Bei dem Netzhautort 12° temporal beträgt der Anteil von n_{L_U} an n_∞ auch bei skotopischen Leuchtdichten schon über 10 % und steigt noch mit L_U an. Im photopischen Bereich läuft diese Kurve in ein Plateau (etwa bei L_U zwischen 1 und 100 cd/m^2) und scheint für noch höhere Umfeldleuchtdichten wieder abzufallen. Dieses Verhalten ist ein Ausdruck dafür, daß bei Adaptation an hohe Leuchtdichten die Blendwirkung in der Peripherie stärker ausgeprägt ist als in der Fovea. Bei Leuchtdichten, die Blendung hervorrufen, ist es kaum möglich, zwischen gleichzeitig angebotenen Leuchtdichten unterhalb dieser Blendleuchtdichte zu differenzieren. Es ist also zu erwarten, daß alle 3 Kurven einen Plateaubereich besitzen bzw. sogar wieder abfallen. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, daß die entsprechenden kritischen Leuchtdichten in der Peripherie niedriger liegen als in der Fovea und ihrer unmittelbaren Umgebung.

In der Praxis wird der (theoretische) Gesamtumfang n_∞ gewöhnlich nie ausgenutzt, da der Parameter c für extrem hohe Testfeldleuchtdichten L sicher nicht mehr konstant ist, sondern steigt.

Die schwache Konvergenz ($c \approx 1.2$) des Integrals (18b) bewirkt die überraschend hohen Zahlen für n_∞. Wenn wir die Ergebnisse (foveal) auf $L_U = 1000\ cd/m^2$ extrapolieren und dabei $c = 1.3$ setzen (entsprechend dem beschriebenen leichten Ansteigen von c mit L_U), so folgt:

$$n_{L_U} = 86, \quad n_\infty = 176, \quad n_{L_U}/n_\infty = 0.49.$$

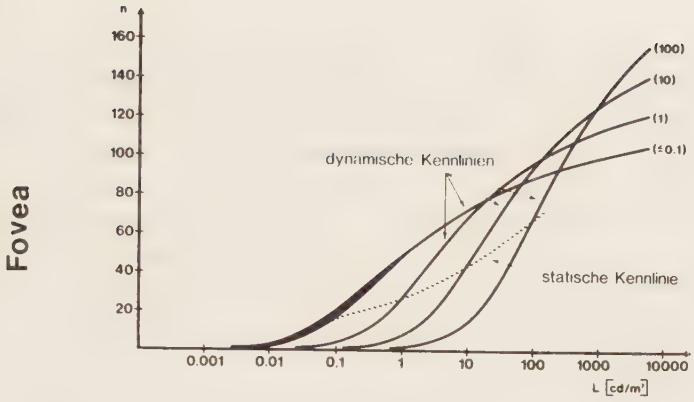
Hier ist also n_∞ niedriger als bei $L_U = 100\ cd/m^2$. Durch die steilere charakteristische Funktion $\Delta L(L)$ für $L_U = 1000\ cd/m^2$ ergibt sich durch die stärkere Konvergenz des Integrals eine Einschränkung des Dynamikumfanges. Außerdem sind wir damit fast in dem Bereich, in dem oberhalb und unterhalb L_U gleiche Anteile der dynamischen Kennlinie liegen.

Die Zahl $n_\infty = 200$ kann also kaum überschritten werden. Demnach scheint der maximale Dynamikumfang des Auges im Leuchtdichtebereich um $L_U = 100\ cd/m^2$ zu liegen.

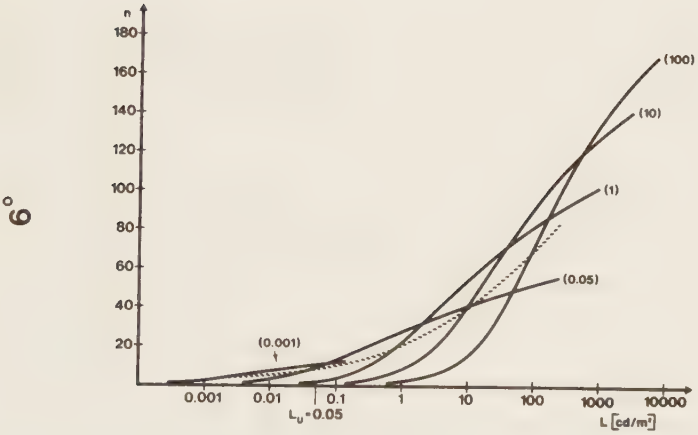
Dieser Befund stimmt auch mit den Beobachtungen von v. HELMHOLTZ überein (s. S. 1 und 2). v. HELMHOLTZ gab an, daß die Unterschiedsschwelle bei direkter Sonnenbestrahlung der rotierenden Scheibe schlechter war als bei indirekter Beleuchtung. Es gibt also einen optimalen Bereich der Adaptationsleuchtdichte, in dem die LUE ihr absolutes Maximum hat und damit auch der Dynamikumfang sein Maximum erreicht.

In Abb. 41 sind die Kennlinien für die verschiedenen Netzhautorte zusammengestellt. Hier treten die eben beschriebenen Zusammenhänge besonders deutlich hervor. Zur Peripherie hin werden die dynamischen Kennlinien insgesamt

a)



b)



c)

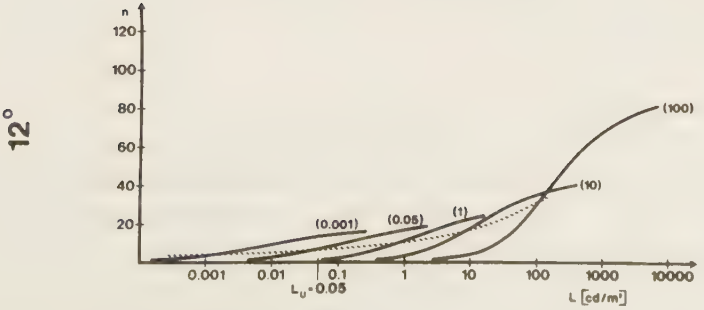


Abb. 41. Zusammenstellung der Kennlinien für die versch. Netzhautorte a) Fovea, b) 6° und c) 12° temporal

flacher. Dafür ergibt sich für skotopische Adaptationsleuchtdichten eine deutliche Verbesserung. Für das foveale Sehen ist es unbedeutend, ob man an 0.001 oder 0.01 cd/m^2 adaptiert ist. Die zugehörige dynamische Kennlinie ist praktisch dieselbe. Sie ist nur von der Tätigkeit der Zapfen abhängig. Die geringfügigen Unterschiede der dynamischen Kennlinien für skotopische Adaptationsleuchtdichten sind in Abb. 41a für $L_U \leq 0.1$ cd/m^2 durch den dicker gezeichneten unteren Ast der Kennlinie hervorgehoben. Die statische Kennlinie verläuft im skotopischen Bereich mit in dem stärker gezeichneten Teil der dynamischen Kennlinie. Für fallendes L_U konvergiert die statische Kennlinie schnell gegen 0.

Im Gegensatz zur Fovea gehört parafoveal auch zu jeder skotopischen Adaptationsleuchtdichte eine eigene dynamische Kennlinie.

6° parafoveal (Abb. 41b) finden wir für große L_U ähnliche Kennlinien wie foveal. Zu niedrigen Adaptationsleuchtdichten hin beginnen die dynamischen Kennlinien immer noch unterhalb der jeweiligen L_U. Entsprechend konvergiert die statische Kennlinie nicht so schnell gegen 0. Im untersuchten Bereich ist sie deutlich von 0 verschieden.

Bei dem Netzhautort 12° parafoveal werden die skotopischen Kennlinien schon etwas steiler als diejenigen bei 6°. Für hohe Umfeldleuchtdichten sind die Kurven aber dafür sehr viel flacher. Entsprechend verläuft die statische Kennlinie auch flacher.

5.3.3 Die statischen Kennlinien

Die statischen Kennlinien sind von besonderer Bedeutung. Wie schon erwähnt, geben sie an, wieviele Unterschiedsschwellen bis zur Adaptationsleuchtdichte bereits durchlaufen sind. Diese Zahl ist nach FECHNER (1859, 1860, 1877) ein Maß für die subjektiv empfundene Helligkeit. Je mehr Unterschieds-

schwellen bis zur Adaptationsleuchtdichte durchlaufen sind, umso heller wird sie empfunden. Der Verlauf der statischen Kennlinie in Abhängigkeit von L_U gibt also an, wie hell die jeweilige mittlere Adaptationsleuchtdichte bewertet wird.

In der Abb. 42 sind die 3 statischen Kennlinien dargestellt. Abszisse: die Adaptationsleuchtdichte, Ordinate: die Zahl n_{L_U}, der jeweilige Wert der statischen Kennlinie im log-Maßstab. Für die Fovea macht die entsprechende Kurve den erwarteten Knick im mesopischen Bereich. Im Netzhautort 6^o hat n_{L_U} bei hohen Umfeldleuchtdichten etwa dieselben Werte wie in der Fovea, für niedrige L_U nähert sie sich der Kurve für 12^o temporal. Im mesopischen Bereich überschneiden sich alle 3 Kurven. Bedeutsam erscheint, daß in dieser log-log-Darstellung n_{L_U} proportional zu L_U ist. Das gilt für die Fovea im photopischen Bereich und für 12^o temporal im gesamten Bereich. Für die weitere Peripherie scheinen also Begriffe wie photopisch-skotopisch irrelevant zu sein. Die subjektive Helligkeitsempfindung nimmt mit der Adaptationsleuchtdichte im gesamten Bereich gleichmäßig zu. n_{L_U}, das Maß für die subjektive Helligkeit nach FECHNER, läßt sich in einer Potenzfunktion darstellen. Die Steigung beträgt etwa 0.2.

Es existiert also eine eindeutige Abbildung der nach FECHNER durch Aneinanderreihen von Unterschiedsschwellen gewonnenen Größe für die subjektive Helligkeitsempfindung zu der von STEVENS (1957, 1966a, 1971) angegebenen Potenzfunktion für die Helligkeitsempfindung. STEVENS gibt einen Steigungsfaktor von 0.3 an, was in der hier gefundenen Größenordnung liegt.

Besonders auffällig ist die Parallelität der unteren mit der oberen Kurve. (Es muß auch hier zunächst darauf hingewiesen werden, daß die Testfeldgröße bei den fovealen und parafovealen Untersuchungen aus methodischen Gründen

unterschiedlich war. Eine Änderung der Testfeldgröße bedingt aber nach 4.1.1a nur eine Parallelverschiebung der entsprechenden Kurven. Eine Parallelverschiebung ändert aber nichts an den folgenden Aussagen.) Hierin steckt die Eigenschaft unseres Auges, die subjektive Helligkeitsbewertung bei einer Änderung der Adaptationsleuchtdichte in der Fovea und der Peripherie im gleichen Verhältnis mitzuändern. Das Verhältnis der statischen Kennlinie von Fovea zu Peripherie ist invariant gegen Änderungen der Adaptationsleuchtdichten (L_U). Wenn die Anzahl der Unterschiedsschwellen ein geeignetes Maß für die Helligkeitsempfindung sein soll, wäre diese Parallelität in Fovea und Peripherie auch zu erwarten. Hierin liegt eine Bestätigung dafür, daß die subjektive Helligkeitsempfindung tatsächlich mit Hilfe der Anzahl der durchlaufenen Unterschiedsschwellen beschreibbar ist - mit anderen Worten - daß die Fechner'sche Skalierung der Empfindungsstärke durch Aneinanderreihen von Unterschiedsschwellen ihre Berechtigung hat.

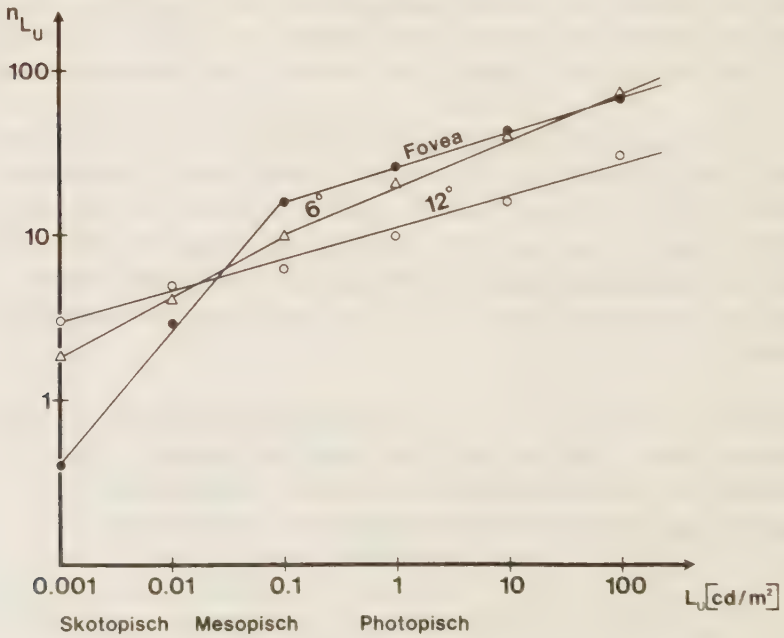


Abb. 42. Darstellung der statischen Kennlinien für die Netzhautorte Fovea, 6° und 12° temporal

5.4 Zeitlicher Verlauf der Adaptation nach sprunghafter Änderung der Umfeldleuchtdichte und Tagesgang

Die in 4.3.1 beschriebene Asymmetrie im Verlauf der Adaptationskurven beim Sprung von einer helleren zu einer niedrigeren Umfeldleuchtdichte ist in einem Spezialfall schon untersucht worden. AULHORN (1963) entdeckte einen ähnlichen Effekt bei Adaptationsversuchen nach Blendung, der bei DANNHEIM (1968) ausführlich beschrieben und untersucht worden ist. Auf S. 5 schreibt er:

"Eine Versuchsperson wurde mit hohen Leuchtdichten ausgeblendet und mußte sich anschließend an eine Dämmerungsleuchtdichte anpassen. Der Anpassungsvorgang wurde durch Messung der Empfindlichkeit für kleinste Lichtunterschiede eines helleren Prüfpunktes gegenüber dieser Dämmerungsleuchtdichte verfolgt. Nachdem die Empfindlichkeit für diese Leuchtdichte-Unterschiedenicht mehr zunahm, also einen Endzustand erreicht hatte, konnte die Versuchsperson noch nicht alle Dinge im Raum so gut erkennen, wie sie es nach langdauernder Anpassung an dieselbe Dämmerungs-Leuchtdichte gewohnt war. Gerade die Gegenstände, welche dunkler waren als ihre Umgebung, konnten erst einige Zeit später richtig wahrgenommen werden."

In diesem Zitat finden wir die Interpretation zu den von uns gewonnenen Ergebnissen, wie sie in den Abb. 26, 27 und 28 dargestellt sind. DANNHEIM untersuchte den zeitlichen Verlauf der Schwellen für Prüfpunkte, die heller und dunkler als das Umfeld waren. Dies ist ein Sonderfall unserer Untersuchung.

Unsere Ergebnisse stimmen für diesen Spezialfall auch gut mit denen DANNHEIM's überein.

DANNHEIM versuchte auch, diesen Adaptationsvorgang als Verschiebung von dynamischen Kennlinien zu beschreiben. Er wählte zur mathematischen Beschreibung der Kennlinien

eine arctan-Funktion. Unseres Erachtens ist die arctan-Funktion nicht sehr geeignet, da sie punktsymmetrisch zu ihrem Wendepunkt ist. Es liegen also immer ebensoviele Unterschiedsstufen unterhalb wie oberhalb des Wendepunktes.

Nach unseren Befunden ist dies nicht unbedingt der Fall. Bei der Berechnung der dynamischen Kennlinien aus unseren Ergebnissen ist der Anfangsteil der Kurve im wesentlichen durch den Parameter ΔL_s bestimmt, während für höhere Testfeldleuchtdichten die Parameter b und c den Verlauf der Kennlinie festlegen. Gerade durch die Verschiedenheit der Adaptation der Parameter ΔL_s und b ist der besondere Effekt, den DANNHEIM (siehe Zitat) beschreibt, erst möglich. Man muß also sogar einen nicht symmetrischen Verlauf der dynamischen Kennlinien fordern, um diesen Effekt deuten zu können.

DANNHEIM hat die Verschiebung der charakteristischen LUE-Kurven ja auch nicht insgesamt gemessen. Seine Ergebnisse lassen sich deshalb schon mit dem "arctan-Modell" beschreiben.

Die Apparatur, die DANNHEIM verwendete, wurde weiter entwickelt zum allgemein bekannten Mesoptometer (nach AULHORN). Hier wird gerade im Gegensatz zu den sonst üblichen Untersuchungsmethoden die Readaptationszeit nach Blendung mit einem Prüfpunkt gemessen, der dunkler als die neue mesopische Adaptationsleuchtdichte ist. Es wird bei dieser Untersuchung also die langsamere zeitliche Adaptation der LUE bei Leuchtdichten unterhalb der neuen Adaptationsleuchtdichte gemessen.

Die zeitliche Verschiebung der LUE-Kurven ist gerade zu Beginn der Adaptation sehr rasch. Diese schnelle Komponente der Adaptation ist auch zu erwarten nach Untersuchungen von HABERICH (1953). Hier wurde die Vp an eine hohe Umfeldleuchtdichte adaptiert und plötzlich umgeschaltet auf ein

dunkles Umfeld. Die einsetzende Adaptation wurde für sehr kurze Zeiten nach dem Leuchtdichtesprung gemessen. Es zeigt sich ein sehr rascher Anstieg der LUE. Obwohl in dieser Anordnung nicht mit Blendleuchtdichten gearbeitet wurde, ergab sich auch ein entsprechender Verlauf der Adaptation mit einer schnelleren und einer langsameren Phase.

Es ist noch zu bemerken, daß bei unserer Anordnung der KOHLRAUSCH'sche Knick nicht auftritt. Dazu liegen die Ausgangsadaptationsleuchtdichten viel zu niedrig. Mit dem Knick ist erst bei Dunkeladaptation nach vorheriger Anpassung an wesentlich höhere Leuchtdichten zu rechnen (HECHT, 1936; CAMPBELL und RUSHTON, 1955; RUSHTON, 1972; DOWLING, 1967).

Der umgekehrte Verlauf, Sprung von einer niedrigen Adaptationsleuchtdichte zu einer helleren, ist in Teilaspekten sehr oft untersucht worden. Besonders der Sprung zu Blendleuchtdichten ist aus naheliegenden praktischen Gründen oft erforscht worden (HARTMANN, 1963; AULHORN, 1963, 1966; LOSSAGK, 1955; RANKE, 1954).

Dort ist auch bereits das Phänomen des Überschwingens der Schwelle über den Endwert hinaus beschrieben. Die vorliegende Darstellung hat den Vorzug, daß dieses Überschwingen als zeitliches Verhalten des Parameters ΔL_s darstellbar ist. Bei diesem Adaptationsvorgang liegt ein völlig entgegengesetztes Verhalten der Parameter ΔL_s und b vor, was den eigentümlichen Verlauf dieser Adaptation bedingt.

Dieses Überschwingen von ΔL_s unterliegt auch besonders stark einem Tagesgang (Abb. 32, 33). Während für konstante Adaptationsleuchtdichten nur geringe Schwankungen im Tagesgang von ΔL_s vorkommen, zeigt der Wert ΔL_s, gemessen direkt nach dem Leuchtdichtesprung, ein deutliches Maximum in den Nachtstunden zwischen 2 und 6 Uhr morgens. Dieser Befund ist in Übereinstimmung mit der Literatur (z.B. KNOERCHEN, GUNDLACH und HILDEBRANDT, 1976).

Unsere gesamten Untersuchungen sind vormittags durchgeführt worden, so daß ein Einfluß des Tagesganges auf die Ergebnisse weitgehend ausgeschlossen werden kann.

6. Weiterführende Fragestellung

Die vorstehenden Untersuchungen sind an einer Gruppe von etwa gleichaltrigen Vpn durchgeführt worden. Wie schon anfangs erwähnt, besteht eine Altersabhängigkeit für das Erkennen dieser Simultankontraste. Besonders bei den Versuchen mit sprunghafter Änderung der Umfeldleuchtdichte dürfen wir eine sehr starke Altersabhängigkeit erwarten. Um die Frage der Altersabhängigkeit zu klären, ist eine gesonderte Untersuchung vorgesehen.

Ferner sind die Versuche mit weißem Licht durchgeführt worden. Die Abhängigkeit der LUE von der spektralen Zusammensetzung der Umfeldleuchtdichten erfordert ebenfalls eine eigene Untersuchung.

Eine weitere wichtige Komponente für die Bereichseinstellung des Auges ist sicherlich der Lidschlag. Mit einer Modifikation der Versuchsanordnung soll der Zusammenhang der Bereichseinstellung des Auges mit der möglichen Bedeutung des Lidschlags für die Lokaladaptation des Sehens beim Umherblicken untersucht werden.

Zunächst soll aber der offensichtliche Zusammenhang zwischen der subjektiven Helligkeitsskalierung nach WEBER und FECHNER und nach STEVENS weiter untersucht werden.

7. Zusammenfassung

Methodik:

Zur Untersuchung der Bereichseinstellung des Auges wurde ein Adaptometer entwickelt:

Eine Vp sitzt vor einer homogen ausgeleuchteten Halbkugel zur Adaptation an eine konstante Umfeldleuchtdichte (L_U). Zentral befinden sich zwei halbkreisförmige aneinandergrenzende Testfelder mit den Leuchtdichten L bzw. L + ΔL, die periodisch für 0.4 sec dargeboten werden. Beobachtung foveal und 6^o bzw. 12^o parafoveal, monokular, ohne Akkommodation (entsprechende Korrektur). Testfeldgröße bei den meisten Versuchen 1^o.

Ergebnisse:

1.) Es wurden die gerade noch wahrnehmbaren Leuchtdichteunterschiede ΔL bestimmt. Für die Abhängigkeit der Schwellenwerte (ΔL) von der Leuchtdichte (L) ergibt sich der einfache Zusammenhang

$$\Delta L = \Delta L_s + b\, L^c$$

Die Parameter ΔL_s (kleinster Wert von ΔL) und b sind bei einer festen Testfeldgröße allein von der Umfeldleuchtdichte L_U abhängig und lassen sich durch Potenzfunktionen von L_U darstellen. Parameter c liegt zwischen 1.1 und 1.5.

2.) Für jede Umfeldleuchtdichte existiert eine Kennlinie für die Bereichseinstellung des Auges, die im Prinzip der "dynamischen Kennlinie" nach der Modellvorstellung von RANKE entspricht. Analog läßt sich auch die "statische Kennlinie" angeben.

3.) Aus den dynamischen Kennlinien lassen sich mit steigender Umfeldleuchtdichte L_U folgende Gesetzmäßigkeiten

herleiten:
a) Die Anzahl der unterscheidbaren Helligkeitsstufen wächst.
b) Der etwa lineare Bereich der Kennlinien, der der Weberschen Regel ($\frac{\Delta L}{L}$ = konst) entspricht, wird ebenfalls größer.
c) Das Maximum der Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit (LUE) nimmt auch zu.

4.) Parafoveal ist die LUE für niedrige Umfeldleuchtdichten L_U besser als foveal. Foveal bleibt die Form der LUE-Kurve für $L_U \leq 0.1$ cd/m^2 praktisch unverändert. Zu höheren L_U hin ist die LUE im Vergleich zur Fovea niedriger, je größer der Abstand von der Fovea ist.

5.) Die statischen Kennlinien sind nach FECHNER ein Maß für die subjektiv empfundene Helligkeit. Die statische Kennlinie für foveales Sehen läßt sich im photopischen Bereich, die für 12° temporal im gesamten untersuchten Bereich als Potenzfunktion von L_U darstellen. Die Kurven sind parallel, die Steigungen betragen für beide 0.2. Das Verhältnis der statischen Kennlinien von Fovea zur Peripherie ist also invariant gegen Änderungen der Adaptationsleuchtdichte L_U.

6.) Nach Sprüngen in der Adaptationsleuchtdichte kann der Verlauf der Adaptation durch das Verhalten der Parameter ΔL_s und b beschrieben werden. Beim Sprung zu einer niedrigen Umfeldleuchtdichte zeigt ΔL_s eine größere Zeitkonstante als Parameter b. Hierdurch ist eine Unsymmetrie der Adaptation bedingt. Umgekehrt zeigt ΔL_s ein overshoot-Phänomen beim Sprung zu einer höheren Umfeldleuchtdichte.

7.) Das overshoot-Verhalten des Parameters ΔL_s nach Sprüngen zu helleren Adaptationsleuchtdichten zeigt einen deutlichen Tagesgang. Zwischen 2 und 6 Uhr morgens hat die Differenz zu dem Endwert von ΔL_s ein deutliches Maximum.

Literaturverzeichnis

AULHORN, E.: Über die Sehschärfe bei herabgesetzter Beleuchtung. Ber. Dtsch. Ophthal. Ges., pp. 555-559, 1961

AULHORN, E.: Blendung aus der Sicht des Ophthalmologen. Ber. Dtsch. Ophthal. Ges., pp. 454-462, 1963

AULHORN, E.: Über die Blendungsempfindlichkeit des gesunden und des kranken Auges. Auge - Licht - Verkehrsgeschehen. Arbeitstagung der Lichttechnischen Ges. E. V., Mainz 1966

AULHORN, E., HARMS, H., RAABE, M.: Die Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit als Funktion der Umfeldleuchtdichte. Doc. Ophthal. 20, 537-556 (1966)

AULHORN, E., HARMS, H.: Unterschiedsschwellen der Leuchtdichte. Ophthalmologica 169, 50-60 (1974)

BAKER, H.D.: Some direct comparisons between light and dark adaptation. J. opt. Soc. Amer. 45, 839-844 (1955)

BAKER, H.D.: Initial stages of dark and light adaptation. J. opt. Soc. Amer. 53, 98-103 (1963)

BAKER, H.D., DORAN, M.D., MILLER, K.E.: Early dark adaptation to dim luminances. J. opt. Soc. Amer., 49, 1069-1070 (1959)

BARLOW, H.B.: Dark and light adaptation: Psychophysics. In: Hdb. Sens. Physiol. VII/4, pp. 1-28. Hrsg.: D. JAMESON and L.M. HURVICH. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972

BÉKÉSY, G.v.: A new audiometer. Acta oto-laryng. 35, 411-422 (1947) zit. in: G.v. BÉKÉSY: Physiologie der Sinneshemmung. W. Goldmann-Verlag, München, 1970

BLACKWELL, H.R.: Studies of psychological methods for measuring visual thresholds. J. opt. Soc. Amer. 42, 606-616 (1952)

BLACKWELL, H.R.: Neural theories of simple visual discrimination. J. opt. Soc. Amer. 53, 129-160 (1963)

BLACKWELL, H.R.: Luminance difference thresholds. In: Hdb. Sens. Physiol. VII/4, pp. 78-101. Hrsg.: D. JAMESON and L.M. HURVICH. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972

BOUGUER, P.: Traité d'optique sur la gradation de la lumière. Paris 1760. Zit. in: RUSHTON (1972a)

CAMPBELL, F.W., RUSHTON, W.A.H.: Measurement of the scotopic pigment in the living human eye. J. Physiol. 130, 131-147 (1955)

CRAIK, K.J.W.: The effect of adaptation on differential brightness discrimination. J. Physiol. 92, 406-421 (1938)

CRAWFORD, B.H.: Photochemical laws and visual phenomena. Proc. Roy. Soc. B 123, 69-89 (1937)

CRAWFORD, B.H.: The changes of visual sensitivity with time. Proc. Roy. Soc. B 133, 63-75 (1946)

CRAWFORD, B.H.: Visual adaptation in relation to brief conditioning stimuli. Proc. Roy. Soc. B 134, 283-302 (1947)

CREUTZFELDT, O.D.: Transfer function of the retina. Electroencephalo. Clin. Neurophysiol., Suppl. 31, 159-169 (1972)

DANNHEIM, F.: Über die Untersuchung der Dunkelanpassung mit hellen und dunklen Prüfpunkten. Diss. Tübingen 1968

DOWLING, J.E.: The site of visual adaptation. Science, 155, 273-279 (1967)

FALTIN, P.: Untersuchungen über die Abhängigkeit der Erkennbarkeit von Objektgröße, Kontrast und Adaptationsleuchtdichte. Diss. Kiel 1962

FECHNER, G.TH.: Über ein psychophysisches Grundgesetz und dessen Beziehung zur Schätzung der Sterngrößen. Abh. K. Sächs. Ges. Wiss. Math.-Phys., Bd. 4, 457-532 (1859)

FECHNER, G.TH.: Elemente der Psychophysik. Leipzig: Breitkopf & Härtel, 1860

FECHNER, G. TH.: In Sachen der Psychophysik.
Breitkopf & Härtel, Leipzig, 1877

HABERICH, F.J.: Über einen rasch ablaufenden Adaptationsvorgang nach Blendung.
Die Naturwissenschaften 41/1, 23-24 (1954)

HARTMANN, E.: Die Blendung aus der Sicht des Physikers.
Ber. Dtsch. Ophthal. Ges. 65, pp.446-453, 1963

HARTMANN, E.: Sofortadaptation.
Ber. Dtsch. Ophthal. Ges. 69, pp.566-569, 1969

HECHT, S.: Intensity discrimination and its relation to the adaptation of the eye.
J. Physiol. 86, 15-21 (1936)

HEINEMANN, E.G.: Simultaneous brightness induction as a function of inducing and testfield luminances.
J. Exp. Psychol. 50, 89-96 (1955)

HEINEMANN, E.G.: The relation of apparent brightness to the threshold for differences in luminances.
J. Exp. Psychol. 61, 389-399 (1961)

HEINEMANN, E.G.: Simultaneous brightness induction.
In: Hdb. Sens. Physiol. VII/4, pp. 146-169.
Hrsg.: D. JAMESON and L.M. HURVICH.
Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972

HELMHOLTZ, H. v.: Handbuch der Physiologischen Optik, (Bd. 1-3). Verlag Voss, Hamburg und Leipzig, 1856-1866

HENSEL, H.: Allgemeine Sinnesphysiologie - Hautsinne, Geschmack, Geruch. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1966

HENSEL, H.: Allgemeine Sinnesphysiologie. In: W.D. KEIDEL: Kurzgefaßtes Lehrbuch der Physiologie Georg Thieme, Stuttgart, 4. Aufl. 1975

KERN, E.: Der Bereich der Unterschiedsempfindlichkeit des Auges bei festgehaltenem Adaptationszustand. Z. Biol. 105, 237-245 (1953)

KNOERCHEN, R., GUNDLACH, E. - M., HILDEBRANDT, G.: Tagesrhythmische Schwankungen der visuellen und vegetativen Lichtempfindlichkeit beim Menschen. In: Biologische Rhythmen und Arbeit. Hrsg.: G. HILDEBRANDT Springer-Verlag, Wien - New York 1976

KÖNIG, A., BRODHUN, E.: Experimentelle Untersuchungen über die psychophysische Fundamentalformel in Bezug auf den Gesichtssinn. 2. Mitteil. S. Ber. Preuß. Akad. Wiss. 1889

KÜHL, A.: Die Abhängigkeit der Unterschiedsschwelle von der Objektgröße und Umfeldleuchtdichte. Z. Instrumentenkunde 60, 293-304 (1940)

LINGELBACH, B., HABERICH, F.J.: Variation der Leuchtdichteunterschiedsempfindlichkeit (LUE) des Auges für den Wahrnehmungsbereich jeweils konstanter Adaptationsleuchtdichten. Pflügers Arch. 370, 259-267 (1977)

LOSSAGK, H.: Die Blend-Störwirkung im Straßenverkehr. Deutsche Kraftfahrtforschung 90, Düsseldorf 1955

MÜLLER, U.: Untersuchung der Hellempfindung unter Berücksichtigung der Änderung des Adaptationszustands des Auges. Z. Biophys. 5, 276-291 (1969)

RANKE, O.F.: Die optische Simultanschwelle. Z. Biol. 105, 224-231 (1953)

RANKE, O.F.: Objektive Lichtverhältnisse bei der Blendung. Arbeitsphysiol. 15, 388-393 (1954)

RANKE, O.F.: Bereichseinstellung der Sinnesorgane. Beih. Regelungstechnik, 123 (1956)

RANKE, O.F.: Sehschärfe, Unterschiedsschwelle und Leuchtdichte. Pflügers Arch. 226, 69-70 (1957)

RANKE, O.F.: Allgemeine Physiologie der Sinnesorgane. In: Handbuch der gesamten Arbeitsmedizin, Bd. I, pp. 207-261. Hrsg.: G. LEHMANN. Urban & Schwarzenberg, 1961

REHDER, W.M.: Der Adaptationszustand des menschlichen Auges in Abhängigkeit von der Leuchtdichteverteilung im Gesichtsfeld. Diss. Math. Nat. Fak. Uni. Hamburg, 1965

RUSHTON, W.A.H.: Light and dark adaptation. Invest. Ophthalm. 11/6, 503-517 (1972a)

RUSHTON, W.A.H.: The early phase of dark adaptation. Vision Res. 12/6, 1083-1093 (1972b)

SAKMANN, B., CREUTZFELDT, O.D.: Scotopic and mesopic adaptation in the cat's retina. Pflügers Arch. 313, 168-185 (1969)

SCHUMACHER, R.O.: Die Unterschiedsempfindlichkeit des helladaptierten menschlichen Auges. Diss. TH Berlin, 1940

SPILLMANN, L., NOWLAN, A.T., BERNHOLZ, C.D.: Dark adaptation in the presence of waning background luminances. J. opt. Soc. Amer. 62, 177-181 (1972)

STEVENS, S.S.: On the psychophysical law. Psychol. Review 64, 153-181 (1957)

STEVENS, S.S.: Duration, luminance and the brightness exponent. Percept. Psychophys. 1, 96-100 (1966a)

STEVENS, S.S.: Sensory power functions and neural events. In: Hdb. Sens. Physiol. I, pp.226-242. Hrsg.: W.R. LOEWENSTEIN. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1971

TIBURTIUS, H.F.: Über die Erholungszeit des menschlichen Auges nach zentraler Blendung. Fortschr. Med. 87, 173-174 (1969)

TRAXEL, W.: Grundlagen und Methoden der Psychologie (Eine Einführung in die psychologische Forschung). Verlag Hans Huber, Bern Stuttgart, Wien, 12. Aufl. 1964

TSCHERMAK, A.: Licht und Farbensinn. In: BETHE's Handbuch der normalen und pathologischen Physiologie. 12/1, pp. 295-501, Springer-Verlag, 1929

WERBLIN, F.S.: Adaptation in a vertebrate retina. Intracellular recording in necturus. J. Neurophysiol. 34/2, 228-241 (1971)

WERTHEIM, TH.: Über die indirekte Sehschärfe. Z. Psychol. 7, 174 (1894)

WESTHEIMER, G.: Spatial interaction in the human retina during scotopic vision. J. Physiol. 181, 881-894 (1965)

WESTHEIMER, G.: Spatial interaction in human cone vision. J. Physiol. 190, 139-154 (1967)

WESTHEIMER, G.: Visual acuity and spatial modulation thresholds. In: Hdb. Sens. Physiol. VII/4, pp. 170-187. Hrsg.: D. JAMESON and L.M. HURVICH. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1972

WYATT, H.J.: Scotopic vision: an unexpected threshold elevation produced by dark annuli. Vision Res. 12, 2147-2150 (1972)

ZERBST, E., DITTBERNER, K.H.: Analyse der Informationsaufnahme und -verarbeitung durch biologische Rezeptoren. Fortschr. exp. theor. Biophysik 17, VEB Georg Thieme, Leipzig, 1973

Danksagung

Herr Prof. Dr. Haberich hatte die Idee, die Bereichseinstellung des Auges und ihre zeitliche Verschiebung nach Leuchtdichtesprüngen zu untersuchen. Ihm danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für seine kontinuierliche Unterstützung durch zahlreiche wertvolle Hilfestellungen und viele Diskussionen.

Die vorliegende Untersuchung wurde als Teilprojekt des Sonderforschungsbereichs "Adaptation und Rehabilitation" von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. Hier muß für die großzügige Förderung durch die DFG gedankt werden, durch welche diese Untersuchung überhaupt erst möglich wurde.

Besonderer Dank gilt Frau Prof. Aulhorn, Tübingen. Sie hat mit zahlreichen Vorschlägen und Anregungen zur Erstellung der Methodik sowie zur Versuchsdurchführung und -auswertung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Das Adaptometer ist zu weiten Teilen in den Werkstätten des Instituts für angewandte Physiologie gebaut worden. Die Schaltpläne zur elektronischen Steuerung wurden von Herrn Ing. Balduf entworfen. Herr Lehrke hat die elektronischen Arbeiten durchgeführt. Ebenso ist hier den Herren Gurkau und Krapp für die Planung und Erstellung weiterer elektronischer Zusatzeinrichtungen zu danken. Die mechanischen Arbeiten wurden von Herrn Graf durchgeführt. Herr Graf hat sich ganz besonders für dieses Projekt engagiert und viele Ideen und Vorschläge beim Erstellen der Apparatur eingebracht.

Hier muß auch mein ehemaliger Kollege aus dem Institut für angewandte Physik, Marburg, Herr Dr. Kirchner, erwähnt werden. Er hat gerade zu Beginn der Arbeit in vielen Diskussionen Anregungen zur Methodik gegeben.

Herr Mazzola hat mit großer Sorgfalt die Abbildungen gezeichnet und photographiert und auch noch alle, bis zum Schluß vorgetragenen Änderungswünsche mit nicht zu übertreffender Geduld ausgeführt.

Der Dank gilt ebenfalls den Mitarbeitern Frau Wedeking, Frau Schmied und später Frau Connan und Frau Peil. Sie haben sowohl bei der Durchführung der Versuche als auch bei der Auswertung wesentlich mitgearbeitet. Insbesondere besorgten sie auch das Schreiben des Manuskripts.

Ganz besonderer Dank allen Versuchspersonen, die sehr geduldig ihre mühevolle Aufgabe durchgeführt haben.

Lebenslauf

Am 30. 4. 1943 wurde ich als viertes Kind des Rektors Christoph Lingelbach und seiner Ehefrau Lisa, geb. Keßler, in Duisburg geboren. Kurz darauf zogen wir nach Marbach bei Marburg um.

In Marbach besuchte ich die Volksschule und später in Marburg die Martin-Luther-Schule. 1963 legte ich an dieser Schule die Reifeprüfung ab.

Ab Sommersemester 1963 studierte ich in Marburg Physik. Nach Vordiplom (1965) und Diplomfächerprüfung (1968) befaßte ich mich im "Institut für angewandte Physik" der Philipps-Universität, Direktor Prof. Dr. Wolter, mit meiner Diplom-Arbeit über das Thema: "Über die Anwendung eines zweidimensionalen Farbschlierenverfahrens in der Mikroskopie". Die Arbeit wurde Anfang 1970 fertiggestellt.

Seit 1. Oktober 1970 bin ich am Institut für angewandte Physiologie als Assistent tätig. Gleichzeitig nahm ich das Studium der Humanbiologie auf. Seit 1974 arbeite ich an der vorliegenden Untersuchung.

Meine akademischen Lehrer waren die Professoren und Dozenten:

Aziz, Behr, Beier, Blume, Braasch, Christian, Dennhardt, Dimroth, Doebner, Fruhstorfer, Ganz, Golenhofen, Gradmann, Grawert, Großmann, Haberich, Hellner, Hensel, Heussner, Hildebrandt, Ihm, Kamke, Karlson, Kirchner, Koecke, Körner, Madelung, Mahr, Mann, Müller, Petry, Petzold, Peyerimhoff, Pfeil, Pollmann, Priebe, Remschmidt, Richert, Rohen, Schaal, Schmidt, Schneider, Schröder, Starke, Stock, Straub, Suchy, Varju, Walcher, Wehrmeyer, Welge-Lüßen, Wendt, Wesemann, Wirsing, Wolter, Zedlitz, Zickendraht.